



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**ESTUDO DA VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL DAS  
IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS UTILIZANDO RECEPTORES  
ESPAÇADOS DE GPS E RECEPTORES VHF**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/INPE - CNPq/MCT)**

**PROCESSO: 105375/2005-5**

**Lilian Piecha Moor - Bolsista INPE/MCT – CNPq/MCT  
Laboratório de Sondagem Ionosférica e Atmosfera Neutra Terrestre  
LSIANT/CRS/CIE/INPE – MCT  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais  
CRS/CIE/INPE – MCT  
E-mail: lilian@lacesm.ufsm.br**

**Dr. Eurico Rodrigues de Paula - Orientador  
Divisão de Aeronomia  
DAE/CEA/INPE – MCT  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
INPE - MCT  
E-mail: eurico@dae.inpe.br**

Santa Maria, Junho de 2008

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO  
PROGRAMA: PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

**PROJETO**

**ESTUDO DA VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL DAS IRREGULARIDADES  
IONOSFÉRICAS UTILIZANDO RECEPTORES ESPAÇADOS DE GPS E  
RECEPTORES VHF**

**PROCESSO: 105375/2005-5**

**Relatório elaborado por Lilian Piecha Moor relatando as atividades executadas  
por:**

**Lilian Piecha Moor** - CRS/CIE/INPE - MCT,  
Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT  
**E-mail:** [lilian@lacesm.ufsm.br](mailto:lilian@lacesm.ufsm.br)

**Dr. Eurico Rodrigues de Paula** – Orientador  
Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – MCT  
**E-mail:** [eurico@dae.inpe.br](mailto:eurico@dae.inpe.br)

**Dr. Nelson Jorge Schuch** - Co-Orientador  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT  
**E-mail:** [njschuch@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br)

**Dr. Clezio Marcos Denardin** - Co-Orientador  
Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – MCT  
**E-mail:** [denardin@dae.inpe.br](mailto:denardin@dae.inpe.br)

## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO**

**Título:**

**ESTUDO DA VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL DAS IRREGULARIDADES  
IONOSFÉRICAS UTILIZANDO RECEPTORES ESPAÇADOS DE GPS E  
RECEPTORES VHF**

**Processo CNPq Nº:** 105375/2005-

**Bolsista:**

Lilian Piecha Moor  
Curso de Física Licenciatura Plena  
Centro de Ciências Naturais e exatas – CCNE/UFSM  
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

**Orientador:**

**Dr. Eurico Rodrigues de Paula**  
Divisão de Aeronomia – DAE/CEA/INPE - MCT  
Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas – CEA/INPE - MCT  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

**Co-Orientadores:**

**Dr. Nelson Jorge Schuch**  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE - MCT

**Dr. Clezio Marcos Denardini**  
Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – MCT

**Colaboradores:**

Márcio Muella - DAE/CEA/INPE – MCT

Acácio Cunha Neto – OESLZ/INPE-MCT

Tiago Jaskulski – UFSM

Juliano Moro - UFSM

César Augusto Daroit – UFSM

Antonio Marcos Martins Silveira – UFSM

**Local de Trabalho/Execução do projeto:**

Laboratório de Sondagem Ionosférica e Atmosfera Neutra Terrestre –  
LSINT/CRS/CIE/INPE – MCT

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do  
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM



## Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



**Grupo de Pesquisa**  
**Clima Espacial, Magnetosferas:**  
**Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br**

**Identificação****Recursos Humanos****Linhas de Pesquisa****Indicadores do Grupo****Identificação****Dados básicos**

**Nome do grupo:** Clima Espacial, Magnetosferas: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br

**Status do grupo:** **certificado pela instituição**

**Ano de formação:** 1996

**Data da última atualização:** 18/06/2008 16:08

**Líder(es) do grupo:** Nelson Jorge Schuch - [nelson.schuch@pq.cnpq.br](mailto:nelson.schuch@pq.cnpq.br)

Ademar Michels - [michels@ct.ufsm.br](mailto:michels@ct.ufsm.br)

**Área predominante:** Ciências Exatas e da Terra; Geociências

**Instituição:** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

**Órgão:** Coordenação de Gestão Científica - CIE

**Unidade:** Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

**Endereço**

**Logradouro:** Caixa Postal 5021

**Bairro:** Camobi

**CEP:** 97110970

**Cidade:** Santa Maria

**UF:** RS

**Telefone:** 33012026

**Fax:** 33012030

**E-mail:** [njschuch@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br)

**Home page:** <http://>

**Repercussões dos trabalhos do grupo**

O Grupo de Pesquisa - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS: INTERAÇÃO TERRA-SOL do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE-MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE - MCT, Lat. 29°26'24"S, Long. 53°48'38"W, Alt. 488m, em São Martinho da Serra, RS, criado por Nelson Jorge Schuch em 1996, colabora com pesquisadores da: UFSM (CT-LACESM), INPE (CEA, ETE, CPA), CRAAM-Universidade P. Mackenzie, IAG/USP, OV/ON, DPD/UNIVAP e SEFET/GO, no Brasil e internacionais do: Japão (Universidades: Shinshu, Nagoya, Kyushu, Takushoku e National Institute of Polar Research), EUA ((Bartol Research Institute/University of Delaware e NASA (Jet Propulsion Laboratory e Goddard Space Flight Center)), Alemanha (University of Greifswald e Max Planck Institute for Solar System Research), Austrália (Australian Government Antarctic Division e University of Tasmania), Armênia (Alikhanyan Physics Institute) e Kuwait (Kuwait University). Linhas de Pesquisas: MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO, AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA, NANOSATC-BR. Áreas de interesse: Heliosfera, Física Solar, Meio Interplanetário, Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo, Aeronomia, Ionosferas, Aeroluminescência, Raios Cósmicos, Muons, Pequenos Satélites Científicos. Objetivos: Pesquisar o acoplamento energético na Heliosfera, os mecanismos de geração de energia no Sol, o Vento Solar, sua propagação no Meio Interplanetário, acoplamento com as magnetosferas planetárias, no Geoespaço com a Ionosfera e a Atmosfera Superior, previsão de ocorrência de tempestades magnéticas e das intensas correntes induzidas na superfície da Terra.

Pesquisas teóricas e observacionais utilizando-se de larga base de dados de sondas no Espaço Interplanetário e dentro de magnetosferas planetárias, bem como de modelos computacionais físicos e estatísticos. Vice-Líderes: Alisson Dal Lago, Nalin Babulau Trivedi, Marcelo Barcellos da Rosa, Ademar Michels.

<b>Recursos humanos</b>	
<b>Pesquisadores</b>	<b>Total: 32</b>
<a href="#">Ademar Michels</a>	<a href="#">Jean Carlo Santos</a>
<a href="#">Alan Prestes</a>	<a href="#">Jean Pierre Raulin</a>
<a href="#">Alicia Luisa Clúa de Gonzalez</a>	<a href="#">Joao Paulo Minussi</a>
<a href="#">Alisson Dal Lago</a>	<a href="#">Jose Humberto Andrade Sobral</a>
<a href="#">Antonio Claret Palerosi</a>	<a href="#">Mangalathayil Ali Abdu</a>
<a href="#">Barclay Robert Clemesha</a>	<a href="#">Marcelo Barcellos da Rosa</a>
<a href="#">Clezio Marcos De Nardin</a>	<a href="#">Nalin Babulau Trivedi</a>
<a href="#">Cristiano Max Wrasse</a>	<a href="#">Natanael Rodrigues Gomes</a>
<a href="#">Delano Gobbi</a>	<a href="#">Nelson Jorge Schuch</a>
<a href="#">Eurico Rodrigues de Paula</a>	<a href="#">Odim Mendes Junior</a>
<a href="#">Ezequiel Echer</a>	<a href="#">Osmar Pinto Junior</a>
<a href="#">Fabiano Luis de Sousa</a>	<a href="#">Otavio Santos Cupertino Durão</a>
<a href="#">Fábio Augusto Vargas dos Santos</a>	<a href="#">Petrônio Noronha de Souza</a>
<a href="#">Fernando Luís Guarnieri</a>	<a href="#">Polinaya Muralikrishna</a>
<a href="#">Hisao Takahashi</a>	<a href="#">Severino Luiz Guimaraes Dutra</a>
<a href="#">Ijar Milagre da Fonseca</a>	<a href="#">Walter Demetrio Gonzalez Alarcon</a>
<b>Estudantes</b>	<b>Total: 29</b>
<a href="#">Alan Carlos Klein</a>	<a href="#">Juliano Moro</a>
<a href="#">Antonio Marcos Martins Silveira</a>	<a href="#">Lilian Piecha Moor</a>
<a href="#">Bernardo Henz</a>	<a href="#">Lorenzo Marzari Félix</a>
<a href="#">Carlos Roberto Braga</a>	<a href="#">Lucas Lopes Costa</a>
<a href="#">Cassio Espindola Antunes</a>	<a href="#">Marcos Vinicius Dias Silveira</a>
<a href="#">César Augusto Daroit</a>	<a href="#">Mateus Sabadi Schuh</a>
<a href="#">Cristiano Sarzi Machado</a>	<a href="#">Nikolas Kemmerich</a>
<a href="#">Eduardo Ceretta Dalla Favera</a>	<a href="#">Rafael Lopes Costa</a>
<a href="#">Fabrício Deives Kummer</a>	<a href="#">Samuel Martins da Silva</a>
<a href="#">Fernando de Souza Savian</a>	<a href="#">Silvano Lucas Prochnow</a>
<a href="#">Guilherme Simon da Rosa</a>	<a href="#">Tardelli Ronan Coelho Stekel</a>
<a href="#">Igor Freitas Fagundes</a>	<a href="#">Tiago Domingos dos Santos</a>
<a href="#">Jean Carlos Daroit</a>	<a href="#">Tiago Jaskulski</a>
<a href="#">Jose Fernando Thuorst</a>	<a href="#">Willian Rigon Silva</a>
<a href="#">Josemar de Siqueira</a>	
<b>Técnicos</b>	<b>Total: 5</b>
Anderson Pereira Colvero - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Eletrônica	
Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação	
Koiti Ozaki - Especialização - Analista de Sistemas	
Roben Castagna Lunardi - Graduação - Técnico em Computação	
Vinicius Ceregati Costa - Graduação - \Outra Função	

Linhas de pesquisa	Total: 4
<ul style="list-style-type: none"><li>• <a href="#">AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA</a></li><li>• <a href="#">MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO</a></li><li>• <a href="#">MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL</a></li><li>• <a href="#">NANOSATC-BR</a></li></ul>	

Relações com o setor produtivo	Total: 0
--------------------------------	----------

Indicadores de recursos humanos do grupo	
Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)	32
Estudante(s)	29
Técnico(s)	5



## Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



### Linha de Pesquisa

## AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA

### Linha de pesquisa

#### AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA

**Nome do grupo:** [Clima Espacial](#), [Magnetosferas: Interações Terra - Sol](#), [NanoSatC-Br](#)

**Palavras-chave:** Aeronomia/Aeroluminescência-Fotômetros/Imageadores; Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS; Eletrojato Equatorial; Interações Sol - Terra; Ionosfera - Digissonda - Radares; Mesosfera - Radares - Rastros Meteóricos;

#### Pesquisadores:

[Barclay Robert Clemesha](#)  
[Clezio Marcos De Nardin](#)  
[Cristiano Max Wrasse](#)  
[Delano Gobbi](#)  
[Eurico Rodrigues de Paula](#)  
[Fábio Augusto Vargas dos Santos](#)  
[Hisao Takahashi](#)  
[Jean Pierre Raulin](#)  
[Mangalathayil Ali Abdu](#)  
[Marcelo Barcellos da Rosa](#)  
[Nelson Jorge Schuch](#)  
[Polinaya Muralikrishna](#)

#### Estudantes:

[Antonio Marcos Martins Silveira](#)  
[Cézar Augusto Daroit](#)  
[Cristiano Sarzi Machado](#)  
[Eduardo Ceretta Dalla Favera](#)  
[Juliano Moro](#)

[Lilian Piecha Moor](#)  
[Mateus Sabadi Schuh](#)  
[Tiago Domingos dos Santos](#)

**Árvore do conhecimento:**

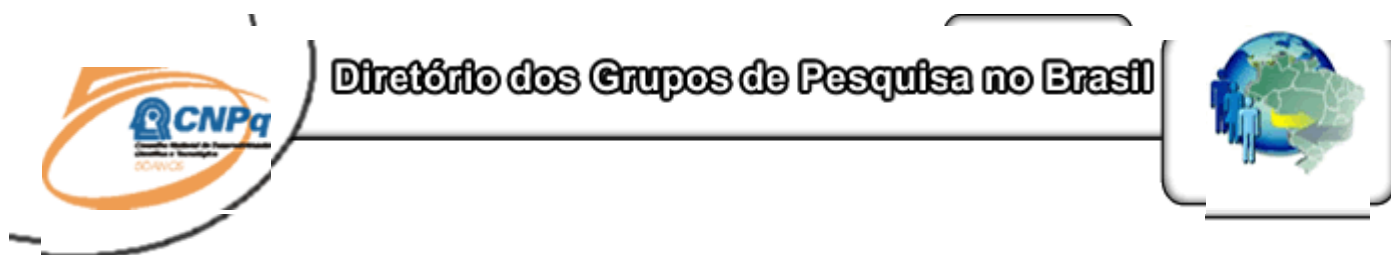
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Aeronomia;  
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Interações Sol - Terra;  
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;

**Setores de aplicação:**

Aeronáutica e espaço

**Objetivo:**

Aeronomia dos fenômenos físicos, químicos e dinâmica da Atmosfera observando com radares, imageadores, fotômetros e aeroluminescência (perfis de ventos) das ondas atmosféricas: planetárias, de gravidade e marés atmosféricas; Pesquisas com radares e digissonda da dinâmica da Troposfera, Estratosfera, Ionosfera e Alta Atmosfera, investigando o acoplamento vertical e transporte de energia do Sistema Atmosfera-Ionosfera na Região Sul Brasileira. Vice-Líder: Marcelo Barcellos da Rosa.



**Estudante**  
**Lilian Piecha Moor**



[Link para Currículo Lattes](#)

[Dados gerais](#)

[Indicadores de produção C, T & A](#)

**Dados gerais**

**Identificação do estudante**

**Nome:** Lilian Piecha Moor

**Nível de treinamento:** Graduação

**Currículo Lattes:** 13/06/2008 19:06

**E-mail:** [lilian@lacesm.ufsm.br](mailto:lilian@lacesm.ufsm.br)

**Homepage:** <http://www.inpe.br>

**Grupos de pesquisa que atua na instituição**

[Clima Espacial, Magnetosferas: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br](#) - INPE

**Linhas de pesquisa que atua**



[AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA](#)

**Orientadores participantes de grupos de pesquisa na instituição**

[Eurico Rodrigues de Paula](#)

**Indicadores de produção C, T & A dos anos de 2005 a 2008**

<b>Tipo de produção</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
Produção bibliográfica	4	4	11	6
Produção técnica	1	7	1	1
Produção artística/cultural e demais trabalhos	0	0	0	0
Orientação concluída	0	0	0	0



*"Sem a oposição do vento, a pipa não consegue subir."*

*(Provérbio Chinês)*

## AGRADECIMENTOS

À priori a aluna gostaria de agradecer a seus pais, João B. Moor e Nadir Moor, pelo constante apoio e incentivo nos meus estudos.

A Deus pelo dom da vida, da sabedoria, da perseverança e do amor. Sem Ele nada seria possível.

Ao Dr. José Carlos Becceneri, Coordenador do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, por ter acreditado no meu potencial para realizar este Projeto Científico.

Em especial ao meu Co-Orientador Dr. Nelson Jorge Schuch, mentor e criador do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT e do Laboratório de Sondagem Ionosférica e Atmosfera Neutra Terrestre - LSIANT/CRS/CIE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS, pela confiança depositada, pela orientação pessoal/profissional e acadêmica e pelo constante incentivo, sempre indicando a direção a ser tomada nos momentos de maior dificuldade.

Ao meu orientador Dr. Eurico Rodrigues de Paula, Pesquisador da Divisão de Aeronomia – DAE/CEA/INPE –MCT, em São José dos Campos, SP pela atenção e orientação que dedicou a bolsista durante o período de Projeto.

Ao Dr. Clezio Marcos Denardini, Pesquisador da Divisão de Aeronomia – DAE/CEA/INPE –MCT pela orientação, pelo apoio ao desenvolvimento do projeto e pelo acompanhamento a minha vida acadêmica e estímulo à execução do Projeto.

Aos colegas de Laboratório Juliano Moro, César Daroit e Antonio Marcos Martins Silveira por toda atenção, companheirismo e ajuda imprescindível no desenvolvimento do Projeto.



Ao funcionário Acácio Cunha, do Observatório de São Luis no Maranhão e o Aluno de Doutorado Márcio Muella da Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – MCT pelas constantes ajudas e pelo apoio técnico, os quais foram imprescindíveis para o desenvolvimento do projeto.

Agradeço aos funcionários e servidores do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, que de alguma forma contribuíram para a realização e sucesso do Projeto, em especial as secretárias Egídia I. Rosa do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT e Angelita Tavares da Chefia do CRS/CIE/INPE - MCT e aos Estagiários Alan Klein e Vinicius Ceregati Costa responsáveis pelo apoio administrativo de secretaria do Secretaria das Ciências da Terra, do Sistema Solar e do Espaço Exterior e da Secretaria das Engenharias e Tecnologias Associadas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT, pelo constante apoio e atenção às minhas necessidades e dos alunos do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais que participaram e colaboraram com o Projeto.

## RESUMO

As bolhas de plasma, após serem geradas na região do equador magnético, tendem a evoluir atingindo dimensões continentais e se deslocam com uma velocidade de aproximadamente 150 m/s para Leste durante períodos magneticamente calmos e para Oeste em períodos magneticamente perturbados. Isto pode fazer com que os sinais eletromagnéticos que as atravessam sofram cintilações, podendo ser fortemente degradados. Estudos do cálculo da velocidade de deriva zonal dessas irregularidades têm sido um dos pontos essenciais para o desenvolvimento de modelos de predição da ocorrência de bolhas de plasma ionosférico. Estas irregularidades possuem diferentes características em função da latitude e sazonalidade ao longo do ano. Foi efetuada a comparação do cálculo da velocidade zonal utilizando sinais de receptores espaçados GPS, com os quais se pode detectar estruturas aproximadamente com 400 km de altura, que representam o tamanho das irregularidades na Ionosfera, com o cálculo da velocidade zonal utilizando receptores VHF, nos quais foram detectadas como estruturas espaciais da ordem de aproximadamente 930 km de tamanho.



## SUMÁRIO

<b>DADOS DE IDENTIFICAÇÃO</b> .....	<b>3</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>11</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>13</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>14</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>18</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>20</b>
<b>ATIVIDADE SOLAR</b> .....	<b>20</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	20
2.2 CICLO SOLAR.....	20
2.3 EXPLOSÕES SOLARES .....	21
2.4 EJEÇÕES CORONAIAS DE MASSA.....	21
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>22</b>
<b>TEMPESTADES MAGNÉTICAS</b> .....	<b>22</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	22
3.2 SUB-TEMPESTADES MAGNÉTICAS .....	24
3.3 ÍNDICES MAGNÉTICOS .....	24
3.3.1 ÍNDICE DST .....	24
3.3.2 ÍNDICE KP .....	25
3.3.3 ÍNDICE AE.....	26
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>27</b>
<b>IONOSFERA</b> .....	<b>27</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	27
4.2 EQUATORIAL SPREAD F – ESF.....	29
4.3 ANOMALIA DE APPLETON.....	32
4.4 A TEORIA DO DÍNAMO ATMOSFÉRICO .....	33
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>34</b>
<b>O SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)</b> .....	<b>34</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	34
5.2 ESTRUTURA DO SISTEMA GPS .....	34
5.3 POSICIONAMENTO.....	35
5.4 CARACTERÍSTICAS DO SINAL GPS .....	36
5.6 APLICAÇÕES .....	40
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>41</b>
<b>EFEITOS DA IONOSFERA NO SINAL GPS</b> .....	<b>41</b>



6.1 INTRODUÇÃO .....	41
6.2 CINTILAÇÕES IONOSFÉRICAS .....	42
6.3 O ÍNDICE DE CINTILAÇÃO ( $S_4$ ) .....	44
6.4 O ÍNDICE $S_4$ CALCULADO PELOS RECEPTORES SCINTMON .....	46
6.5 MONITOR DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA – SCINTMON.....	48
<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>52</b>
<b>SISTEMA VHF.....</b>	<b>52</b>
7.1 INTRODUÇÃO .....	52
7.1 SISTEMA VHF.....	52
<b>CAPÍTULO 8.....</b>	<b>55</b>
<b>CÁLCULO DA VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS</b> <b>.....</b>	<b>55</b>
8.1 CÁLCULO DA VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL UTILIZANDO RECEPTORES ESPAÇADOS DE GPS .....	55
8.2 CÁLCULO DA VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL UTILIZANDO RECEPTORES VHF .....	56
<b>CAPÍTULO 9.....</b>	<b>58</b>
<b>METODOLOGIA, DADOS E RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
9.1 METODOLOGIA .....	58
9.2 DADOS .....	59
9.3 RESULTADOS .....	61
<b>CAPÍTULO 10.....</b>	<b>64</b>
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>72</b>
<b>DESCRIÇÃO DO ARQUIVO SUMÁRIO.....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>75</b>
<b>CERTIFICADOS DE PALESTRAS E CURSOS E RESUMOS DE CONGRESSOS, OS QUE A</b> <b>BOLSISTA FOI AUTORA E CO-AUTORA.....</b>	<b>75</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.2 – EXPLOSÕES SOLARES. ....	21
FONTE: <a href="http://www.nasa.gov/mission_pages/solar-b/solar_009.html">WWW.NASA.GOV/MISSION_PAGES/SOLAR-B/SOLAR_009.HTML</a> . ....	21
FIGURA 3.1 – SEÇÃO TRANSVERSAL NORTE-SUL DA CAVIDADE GEOGRÁFICA E DO FLUXO DE PLASMA EXTERNO, MOSTRANDO A MAGNETOPAUSA E A FRENTE DE CHOQUE. ....	22
FONTE: HARGREAVES, 1995. ....	22
FIGURA 3.2 – FASES CARACTERÍSTICAS DE UMA TEMPESTADE MAGNÉTICA.....	23
FONTE: DE PAULA ET AL, 1987.....	23
FIGURA 3.3 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DST PARA O MÊS DE MAIO, 1998. ....	24
FONTE: <a href="http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir">HTTP://SWDCDB.KUGI.KYOTO-U.AC.JP/DSTDIR</a> .....	24
PODEMOS CLASSIFICAR UMA TEMPESTADE MAGNÉTICA DE ACORDO COM A SUA INTENSIDADE QUE É FORNECIDA PELO ÍNDICE DST, CONFORME MOSTRADO NA TABELA 3.1. ....	25
TABELA 3.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEMPESTADES MAGNÉTICAS. ....	25
FONTE: RETIRADA DA DISSERTAÇÃO DE FEDRIZZI, 1999. ....	25
TABELA 3.2 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES Kp CONFORME A ATIVIDADE MAGNÉTICA. ....	26
FONTE: WRENN ET AL., 1987. ....	26
FIGURA 4.1 - PERFIS VERTICAIS TÍPICOS DA DENSIDADE ELETRÔNICA. ....	28
FONTE: ADAPTADO DE BAUMJOHANN E TREUMANN (1997, P. 63), RETIRADA DA DISSERTAÇÃO RODRIGUES, 2003. ....	28
FIGURA 4.2 - PERFIL VERTICAL TÍPICO DA IONOSFERA EQUATORIAL PARA O PERÍODO DO PÔR-DO-SOL. ....	31
FONTE: ADAPTADO DE BAUMJOHANN E TREUMANN (1997, P. 63), RETIRADA DA DISSERTAÇÃO RODRIGUES, 2003. ....	31
FIGURA 4.3 – ILUSTRAÇÃO DA TEORIA DA INSTABILIDADE HIDRODINÂMICA RT,.....	31
FONTE: KELLEY (1989, PAG. 76 E 122) RETIRADA DA DISSERTAÇÃO RODRIGUES, 2003. ....	31
FIGURA 5.1 – CONSTELAÇÃO DE SATÉLITES DO SISTEMA GPS.....	35
FONTE: ADAPTADO DE <a href="http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textogps.pdf">HTTP://WWW.RC.UNESP.BR/IGCE/APLICADA/TEXTOGPS.PDF</a> .....	35
FIGURA 5.2 - MODULAÇÃO DO CÓDIGO SOBRE A ONDA PORTADORA. ....	37
FONTE: HOFMANN-WELLENHOF ET AL. (1994, P. 77), RETIRADA DA DISSERTAÇÃO DE FEDRIZZI, 1999.....	37
FIGURA 5.3 - ESQUEMA DE RECEPÇÃO DO SINAL GPS.....	39
FONTE: ADAPTADO DE <a href="http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textogps.pdf">HTTP://WWW.RC.UNESP.BR/IGCE/APLICADA/TEXTOGPS.PDF</a> .....	39
FIGURA 6.1 – ILUSTRAÇÃO DA CINTILAÇÃO DO SINAL AO PASSAR A CAMADA IONOSFÉRICA. ....	41
FONTE: COMUNICAÇÃO PESSOAL DO DR. E. R. DE PAULA.....	41
FIGURA 6.2 - EXEMPLO DE CINTILAÇÃO E CORRESPONDENTES VALORES DE S <sub>4</sub> CALCULADOS PARA INTERVALOS DE 1 MINUTO. ....	48
FONTE: RETIRADA DA DISSERTAÇÃO DE RODRIGUES, 2003. ....	48
TABELA 6.1 - COORDENADAS DAS ESTAÇÕES GPS DISTRIBUÍDAS NO TERRITÓRIO BRASILEIRO.....	49
FONTE: <a href="http://www.dae.inpe.br/iono/iongps/mapport.html">HTTP://WWW.DAE.INPE.BR/IONO/IONGPS/MAPPORT.HTML</a> . ....	49
FIGURA 6.3 - DISPOSIÇÃO DOS 13 RECEPTORES GPS INSTALADOS EM 8 PONTOS SOBRE O TERRITÓRIO BRASILEIRO. ....	49
FONTE: <a href="http://www.dae.inpe.br/iono/iongps/mapport.html">HTTP://WWW.DAE.INPE.BR/IONO/IONGPS/MAPPORT.HTML</a> . ....	49
FIGURA 6.4 - OS PAINÉIS MOSTRAM OS VALORES DE POTÊNCIA EM BANDA LARGA DE SINAL RECEBIDO, WBP EM DECIBÉIS, PARA CADA SATÉLITE RASTREADO NA NOITE DE 02/01/06 PARA 03/01/06, JUNTO A ESTAÇÃO (S) – SANTA MARIA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL DO CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS – OES/CRSPE/INPE – MCT. ....	50
FIGURA 6.5 - OS PAINÉIS MOSTRAM OS VALORES DO ÍNDICE S <sub>4</sub> , CALCULADOS PARA OS SINAIS MOSTRADOS NA FIGURA 6.2. VALORES DE S <sub>4</sub> ACIMA DE 0.2 ESTÃO ASSOCIADOS A IRREGULARIDADES, JUNTO A ESTAÇÃO (S) – SANTA MARIA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL DO CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS – OES/CRSPE/INPE – MCT. ....	51



FIGURA 7.1 - ANTENAS DO TIPO YAGI DO SISTEMA VHF, INSTALADAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DE SÃO LUIS – OESLZ/INPE – MCT, SÃO LUIS-MA. ....	53
FIGURA 7.2 - SINAIS PROCESSADOS COM INFORMAÇÕES DO ÍNDICE $S_4$ E CALCULO DA VELOCIDADE DE DERIVA DAS CINTILAÇÕES DETECTADAS EM SÃO LUIS-MA.....	53
FIGURA 8.1 – EXEMPLO DE GRÁFICOS DE ÍNDICE $S_4$ DURANTE O PROCESSAMENTO DO CÁLCULO DA VELOCIDADE ZONAL DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS. AS SETAS INDICAM ONDE DEVE SER FEITA A SELEÇÃO DO PERÍODO. ....	55
FIGURA 8.2 – EXEMPLO DO CÁLCULO DA VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS PARA O DIA 25/10/2003 SOBRE CACHOEIRA PAULISTA-SP, BRASIL. ....	56
FIGURA 8.3 – EXEMPLO DO CÁLCULO DA VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS PARA O DIA 28/10/2003 NA REGIÃO SOBRE SÃO LUÍS-MA, BRASIL. ....	57
FIGURA 9.1 – PRÉDIO SEDE DO CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS – CRS/CIE/INPE - MCT – LOCALIZADO EM SANTA MARIA - RS.....	58
FIGURA 9.2 – REGIÕES DO TERRITÓRIO BRASILEIRO COM RECEPTORES VHF E RECEPTORES ESPAÇADOS GPS INSTALADOS PARA O ESTUDO DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS; CACHOEIRA PAULISTA-SP E SÃO LUÍS-MA. ....	60
FIGURA 9.3 - GRÁFICO DO ÍNDICE DST PARA O MÊS DE OUTUBRO DE 2003. ....	60
FONTE: ADAPTADA DE <a href="http://www.kugl.kyoto-u.ac.jp/DSTDIR/DST1/PROV">HTTP://WWW.KUGL.KYOTO-U.AC.JP/DSTDIR/DST1/PROV</a> .....	60
FIGURA 9.4 – VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL DAS BOLHAS DE PLASMA PARA O PERÍODO MAGNETICAMENTE CALMO, 18-27 DE OUTUBRO DE 2003 PARA SÃO LUÍS. ....	62
FIGURA 9.5 – VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL DAS BOLHAS DE PLASMA PARA O DIA MAGNETICAMENTE PERTURBADO, 28 DE OUTUBRO DE 2003 PARA CACHOEIRA PAULISTA. ....	62
FIGURA 9.6 – VELOCIDADE ZONAL DAS BOLHAS DE PLASMA IONOSFÉRICAS PARA O PERÍODO MAGNETICAMENTE CALMO, 18-27 DE OUTUBRO DE 2003. ....	63

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

O aparecimento das irregularidades ionosféricas, tais como as bolhas de plasma, segue um determinado padrão sazonal. A época de observação das bolhas ionosféricas normalmente tem início em setembro e segue até março. Com relação ao horário de ocorrência, elas são observadas nos períodos entre as 18 horas e 6 horas (hora local). Entretanto, as bolhas de plasma podem ser observadas em outras estações do ano em períodos magneticamente perturbados. As bolhas de plasma causam mudanças no índice de refração e dispersam ondas de rádios transionosféricas. Estas flutuações causadas pelas bolhas de plasma são denominadas de “cintilações ionosféricas”.

A determinação da velocidade zonal das irregularidades ionosféricas é muito importante, pois após serem geradas no equador magnético e evoluírem atingindo dimensões continentais, elas se deslocam para leste e grande parte dos sinais eletromagnéticos que as atravessam sofrem cintilações podendo ser drasticamente afetados.

As irregularidades ionosféricas são muito estudadas, pois afetam os sistemas de telecomunicações e de posicionamento global, GPS. No Brasil foram afetados pelas irregularidades ionosféricas alguns sistemas de telecomunicações da Embratel, sistemas de posicionamento por DGPS, GPS diferencial, das plataformas em águas profundas da Petrobrás e o sistema de navegação aérea CNS/ATM, que se encontra em teste e será implantado pela Força Aérea Brasileira.

A seguir será detalhado o sistema de receptores de GPS que foi instalado no Brasil e seus dados, e o sistema de receptores de VHF, cujos dados serão utilizados neste projeto, o desenvolvimento do projeto incluindo as metodologias a serem utilizadas e as referências bibliográficas.



Nos Capítulos 2, 3 e 4 é realizada uma revisão bibliográfica sobre a Atividade Solar, Tempestades Magnéticas e Ionosfera, respectivamente, bem como suas características relevantes para o assunto discutido. O Capítulo 5 traz um relato do sistema GPS. No Capítulo 6 são relatados alguns efeitos da Ionosfera no sinal GPS. No Capítulo 7 é descrita o sistema vhf. No Capítulo 8 é mostrado como se realiza o cálculo da velocidade de deriva zonal das irregularidades ionosféricas. No Capítulo 9 consta a análise de dados relativos ao objetivo deste Trabalho, o estudo da velocidade de deriva zonal das irregularidades ionosféricas utilizando receptores espaçados de GPS e receptores VHF, a metodologia e atividades extras exercida pelo bolsista no período do Projeto. Considerando os resultados obtidos através da análise dos dados selecionados o Capítulo 10 descreve as conclusões deste Projeto.

## CAPÍTULO 2

### ATIVIDADE SOLAR

#### 2.1 Introdução

A região que se estende desde o Sol até o meio interestelar é chamada de Meio Interplanetário. É neste meio que ocorrem diversos fenômenos energéticos, sendo um grande número proveniente da atividade solar, a qual varia com o mais importante ciclo do Sol o Ciclo Solar de 11 anos.

#### 2.2 Ciclo Solar

O Ciclo Solar varia com um período de 11 anos, caracterizado por um aumento no número de manchas solares atingindo um máximo e decrescendo logo em seguida, ver Figura 2.1. São caracterizadas duas fases a fase de mínimo solar (ascendente) e a fase de máximos solar (descendente). No máximo solar temos um aumento na ocorrência de fenômenos energéticos nas regiões ativas associadas às Manchas Solares, regiões frias da fotosfera solar, onde o campo magnético é mais intenso. Os fenômenos energéticos podem ser as Explosões Solares ou Ejeções Coronais de Massa (CMEs).

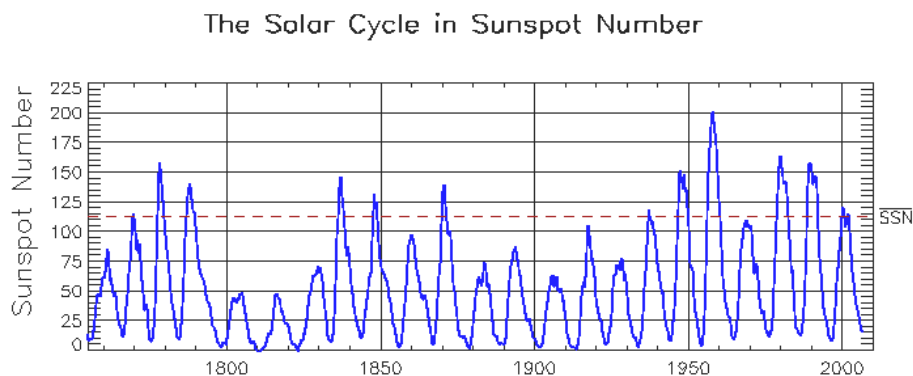


FIGURA 2.1 – Ciclo solar relacionado com o número de manchas solares.  
FONTE: [www.sec.noaa.gov/SolarCycle/SC24/Biesecker.ppt](http://www.sec.noaa.gov/SolarCycle/SC24/Biesecker.ppt).

### 2.3 Explosões Solares

Fenômeno caracterizado pela emissão de uma grande quantidade de radiação em curtos intervalos de tempo. Estas explosões afetam a operação de satélites artificiais, podendo até mesmo danificá-los, caso não estejam convenientemente blindados contra radiações.

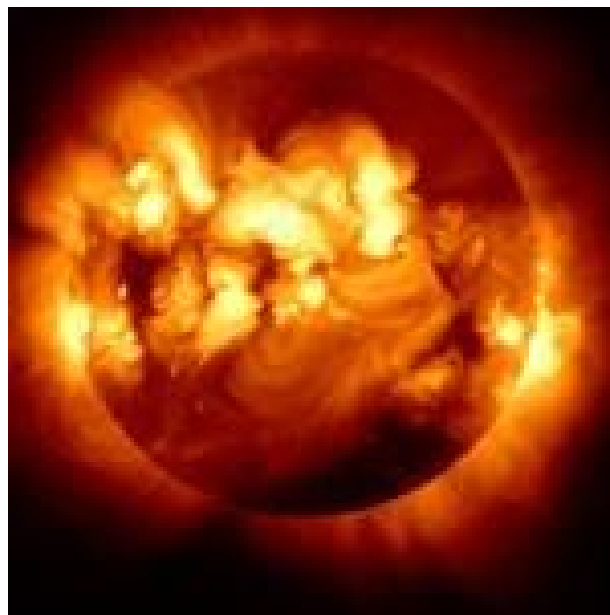


FIGURA 2.2 – Explosões solares.

FONTE: [www.nasa.gov/mission\\_pages/solar-b/solar\\_009.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/solar-b/solar_009.html).

### 2.4 Ejeções Coronais de Massa

Este fenômeno é caracterizado pela expulsão de uma grande quantidade de matéria do Sol entremeadas nas linhas de campo magnético. As Ejeções de Massa Coronal são a principal fonte da origem das tempestades geomagnéticas, conteúdo abordado no Capítulo 3.

## CAPÍTULO 3

### TEMPESTADES MAGNÉTICAS

#### 3.1 Introdução

As tempestades magnéticas são grandes perturbações no campo magnético da Terra, tendo recebido esta denominação desde a metade do século XIX (Gonzalez et al, 1994). Emissões supersônicas de plasma oriundas do vento solar confinam e distorcem as linhas do campo magnético terrestre em uma cavidade longa com uma cauda que se estende por centenas de raios terrestres na direção anti-solar, esta cavidade denomina-se magnetosfera, ver Figura 3.1. A característica principal de uma tempestade magnética e o decréscimo da componente H do campo Geomagnético e a posterior fase de recuperação (Kamide et al., 1998). O decréscimo é atribuído ao aumento de partículas aprisionadas na magnetosfera. A magnetosfera que é formada pelo campo magnético da Terra atua como uma camada protetora para o planeta Terra desviando o campo magnético e o plasma interplanetário. Derivas devido ao gradiente do campo magnético da Terra e a sua curvatura produzem a “Corrente de Anel”.

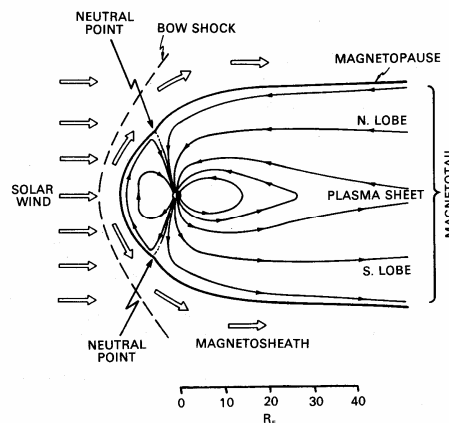


FIGURA 3.1 – Seção transversal norte-sul da cavidade geográfica e do fluxo de plasma externo, mostrando a Magnetopausa e a frente de choque.

FONTE: Hargreaves, 1995.

Essa corrente é gerada pelo movimento de partículas eletricamente carregadas, sendo que prótons derivam da meia-noite em direção ao anoitecer e elétrons da meia-noite em direção ao amanhecer, devido distribuição de partículas injetadas e aprisionadas na magnetosfera interna.

Esta corrente diminui a intensidade do campo magnético terrestre e um aumento na sua intensidade é o primeiro indicador de uma tempestade magnética. De acordo com Gonzalez et al. (1994), a tempestade magnética é um intervalo de tempo quando um campo elétrico de convecção interplanetário de longa duração e suficientemente intenso produz através de uma substancial energização no sistema magnetosfera-Ionosfera, uma corrente de anel suficientemente intensa para exceder o limiar da magnitude do índice Dst (definido posteriormente), o qual quantifica a intensidade da tempestade magnética.

Uma tempestade magnética caracteriza-se por três fases: (1) Um início súbito – sudden commencement – ou fase inicial, esta associada ao aumento da pressão dinâmica, incidência de partículas do vento solar, que comprime a magnetosfera indicando um aumento brusco no campo magnético. (2) Fase principal – main phase – e caracterizada por uma redução na intensidade do campo magnético na Superfície Terrestre, essa redução está associada a Corrente de Anel e (3) Uma fase de recuperação – recovery phase – caracterizada pela diminuição e eliminação gradual da pressão passando a predominar os processos de perda da Corrente de Anel. A Figura 3.2 mostra as fases de uma tempestade magnética.

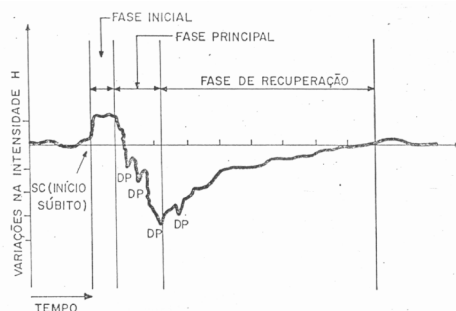


FIGURA 3.2 – Fases características de uma tempestade magnética.  
FONTE: de Paula et al, 1987.

### 3.2 Sub-Tempestades Magnéticas

Muitos estudos mostram que Tempestades magnéticas são resultados de constantes sub-tempestades. Uma sub-tempestade magnetosférica é um processo transiente, iniciando no lado noturno da Terra, através da qual uma significativa quantidade de energia derivada da interação vento solar-magnetosfera é depositada na magnetosfera e Ionosfera auroral.

Em períodos de sub-tempestades há a injeção de partículas carregadas na Corrente de Anel e no Cinturão de Van Allen, estas partículas provenientes do vento solar ficam depositadas na magnetosfera interna. São sugeridos processos importantes associados às sub-tempestades, como a rápida penetração do campo elétrico de convecção na Magnetosfera interna, resultando na injeção de plasma da bainha de plasma na região de aprisionamento.

### 3.3 Índices Magnéticos

Os distúrbios geomagnéticos são monitorados a partir de estações terrenas, instaladas em observatórios magnéticos que registram a intensidade do campo geomagnético.

#### 3.3.1 Índice Dst

O índice Dst (Disturbance Storm-Time), é uma medida simétrica da Corrente de Anel e obtido em unidades de nano Tesla (nT) e resolução temporal de uma hora, a Figura 3.3 mostra um esboço do índice Dst para maio de 1998.

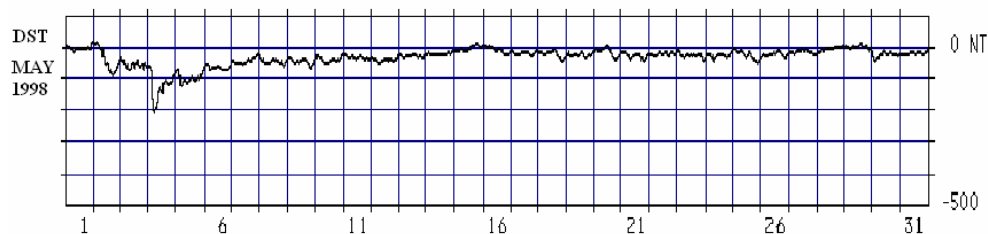


FIGURA 3.3 – Variação do índice Dst para o mês de maio, 1998.

FONTE: <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir>



Para a determinação deste índice, utiliza-se a medida da componente horizontal (H) do campo geomagnético de superfície fornecida por estações localizadas em baixas latitudes e distribuídas longitudinalmente. Ele é obtido pela subtração da componente de períodos calmos, o valor médio das componentes H das estações contribuintes e calculado e multiplicado pela secante da latitude média das estações contribuintes (Rostoker et al., 1997). O índice Dst contém contribuições de sistemas de correntes que não são azimutalmente simétricas, como por exemplo, a Corrente de Anel assimétrica, “magnetotal current”. Considera-se o valor da Corrente de Anel simétrica mais um erro associado com outros sistemas de correntes assimétricas.

Podemos classificar uma tempestade magnética de acordo com a sua intensidade que é fornecida pelo índice Dst, conforme mostrado na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Classificação das Tempestades Magnéticas.

Intensidade da Tempestade	Dst (nT)
Muito Intensa	< -250
Intensa	-100 a -250
Moderada	-50 a -100
Fraca	-30 a -50

FONTE: Retirada da dissertação de Fedrizzi, 1999.

### 3.3.2 Índice Kp

O índice Kp global (planetary index) é obtido a partir de uma média que envolve 13 observatórios distribuídos entre 46 e 63 ao norte e -46 e -63 ao sul do equador geomagnético (Komjathy, 1997). Os níveis locais dos distúrbios geomagnéticos K são determinados, para um período de observação de 3 horas, através da diferença entre o maior e o menor valor observado na componente horizontal, do campo geomagnético, a mais

afetada pelos distúrbios. Este índice diário tem uma escala de 28 níveis, variando de zero (muito calmo) até nove (muito perturbado), sendo cada intervalo subdividido em três partes. Como o índice K tem características locais, aplica-se uma tabela de conversão (GFZ, 2001) para eliminar os efeitos locais gerando então o índice Kp global. Ver Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - Distribuição dos valores Kp conforme a atividade magnética.

Comportamento	Kp
Muito calmo	0 a 1
Calmo	1 a 2-
Normal	2- a 3+
Perturbado	3+ a 4+
Muito perturbado	4+ a 9

FONTE: Wrenn et al., 1987.

### 3.3.3 Índice Ae

O índice Ae é utilizado para o estudo da atividade geomagnética na região auroral. Este índice é obtido a partir de medidas das várias variações da componente horizontal H do campo geomagnético, coletados de observatórios selecionados e distribuídos uniformemente ao longo da região auroral no hemisfério norte (Kamei et al. 2000). Os dados são normalizados em relação a um valor base mensal para cada estação, que posteriormente, é subtraído dos dados obtidos para cada minuto do mês considerado.

## CAPÍTULO 4

### IONOSFERA

#### 4.1 Introdução

A presença da porção ionizada da atmosfera terrestre, a Ionosfera, foi detectada antes mesmo do desenvolvimento do sistema moderno de rádio (Rishbeth, H., 1964). Essa camada contém um significativo número de elétrons livres e íons positivos (Hargreaves, 1995). A Ionosfera é considerada eletricamente neutra em larga escala, pois o número de elétrons livres é igual ao número de íons positivos.

A Ionosfera é formada pela ionização de gases atmosféricos  $N_2$ ,  $O_2$  e  $O$ . Em médias e baixas latitudes é ionizada em maior parte pela radiação solar no espectro do Extremo Ultra-Violeta e Raios-X. Uma vez formados os íons e elétrons tendem a se recombinar. A equação da continuidade que expressa a taxa de variação temporal da densidade eletrônica é dada por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - L - \text{div}(Nv) \quad 4.1$$

onde  $q$  é a taxa de produção de elétrons,  $L$  é a taxa de perda da ionização por recombinação eletrônica, e  $\text{div}(nv)$  expressa a perda de elétrons por transporte, e  $v$  é a velocidade das partículas ionizadas. A produção  $q$  de elétrons é dada por:

$$q = \eta \sigma n I \quad 4.2$$

sendo  $I$  a intensidade da radiação ionizante no topo da atmosfera e  $n$  a concentração de átomos ou moléculas capazes de serem ionizadas por este espectro de radiação (Hargreaves, 1995).

Em altas latitudes outra fonte de ionização importante é a precipitação de partículas energéticas, que está associada com as auroras polares. Essas partículas energéticas são emitidas pelo Sol e se intensificam durante as Explosões Solares, do inglês “solar flares”. Os “solar flares” são as perturbações solar que mais afetam a Ionosfera, pois emitem fortemente energia na região espectral dos Raios-X, os quais penetram profundamente nas camadas ionosféricas, conseqüentemente produzindo um elevado aumento na ionização das baixas latitudes (Rishbeth, H., 1964).

À medida que a radiação penetra na atmosfera mais densa a produção de elétrons aumenta até um nível onde a densidade eletrônica é máxima. Abaixo deste nível, a produção de elétrons decresce, pois a maior parte da radiação já foi absorvida, predominando a taxa de perda sobre a taxa de produção de elétrons. Conseqüentemente distintas regiões são formadas na Ionosfera, as quais são chamadas de camadas D, E, F1 e F2. A Figura 4.1 ilustra o perfil típico da densidade eletrônica da Ionosfera, tanto para o dia quanto para a noite.

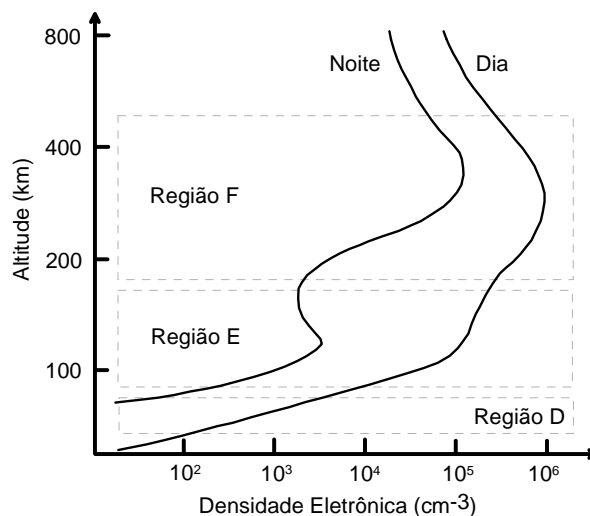


FIGURA 4.1 - Perfis verticais típicos da densidade eletrônica.

FONTE: Adaptado de Baumjohann e Treumann (1997, p. 63), retirada da dissertação Rodrigues, 2003.

A região D da Ionosfera encontra-se situada entre os 60 km e 95 km de altitude e existe somente durante o dia, pois durante a noite os elétrons livres se recombinam com moléculas

formando íons negativos (Tascione, 1988). Este processo é conhecido como “attachment”. Contudo com a presença da radiação os elétrons voltam a aparecer devido ao processo de “dettachment”. A região D é a região mais complexa da Ionosfera, pois além de ter umas pressões relativamente altas, diversas e diferentes fontes de ionização contribuem significativamente na produção de íons. Destas fontes podemos citar: Linha espectral solar Lyman- $\alpha$ , espectro do Extremo Ultra-Violeta (EUV), Raios-X, Raios cósmicos galácticos e partículas energéticas oriundas do Sol (Hargreaves, 1995).

Logo acima da região D encontramos a região E, que se encontra aproximadamente entre 105 km e 160 km. Ambas as regiões D e E são controladas primariamente por processos fotoquímicos de produção e perda, embora os processos de transporte de plasma desempenham um papel fundamental em algumas situações. Na camada E a ionização se dá basicamente no espectro do Extremo Ultra-Violeta (EUV) e Raios-X. A região F1 está situada entre aproximadamente 160 km e 180 km de altitude e é representativa do máximo de produção de íons por fotoionização sendo controlada por processos fotoquímicos. A região F2 estende-se desde 180 km de altura até o início da plasmasfera, em aproximadamente 1000 km. A principal característica desta camada é a existência de uma região de máxima concentração eletrônica conhecida como “pico da camada F”, situada tipicamente aproximadamente aos 300 km de altitude, cuja formação deve-se à competição entre processos químicos e de transporte de plasma. A radiação ionizante desta camada é basicamente a mesma radiação responsável pela ionização da camada F1 (Fedrizzi, 1999).

#### **4.2 Equatorial Spread F – ESF**

O Fenômeno da camada F espalhada (do inglês “Equatorial Spread F” - ESF) foi o nome dado ao espalhamento observado em traços de ionogramas na camada F de baixas latitudes, o qual é considerado como uma hierarquia de instabilidades do plasma nesta região. O fenômeno de ESF foi estudado extensivamente com técnicas experimentais e de modelagem, que revelaram características importantes. O ESF foi investigado por ionossondas, radares de espalhamento coerente, sensores a bordo de foguetes ou satélites,

flutuações na fase e na amplitude de sinais transionosféricos (cintilação), dentre outros (ver, por exemplo; (Abdu et al., 1992; Aarons, 1993, and references therein) (Woodman and LaHoz, 1976; Tsunoda, 1980). (Raghavarao et al;1999).

Atualmente, o termo ESF está associado a um amplo espectro de irregularidades de plasma, com escalas de tamanho variando desde dezenas de centímetros até centenas de quilômetros e ocorrendo desde alturas da região F até alturas em torno de 1500 km (Fejer, 1996). Cada instrumento ou técnica é sensível a uma determinada escala de tamanho ou faixa de escalas (Rodrigues, 2003).

Dungey (1956) foi o primeiro a propor a Teoria da Instabilidade Gravitacional Rayleigh-Taylor (RT) como processo gerador do ESF. Outras teorias também foram apresentadas nas décadas de 50 e 60. Contudo, Farley et al. (1970) concluíram a partir das primeiras medidas realizadas pelo Rádio Observatório de Jicamarca, que nenhuma teoria até então poderia explicar os dados obtidos. Com isto, a Teoria RT juntamente com todas as outras teorias apresentadas até então foram temporariamente rejeitadas, pois estas teorias podiam explicar apenas a geração de estruturas na porção inferior do perfil de densidade de plasma da camada F. Com os passar dos anos, novos estudos foram realizados e uma maior quantidade e qualidade de dados foram obtidos, de forma que a Teoria RT foi aprimorada e generalizada, incluindo parâmetros do ambiente ionosférico, tais como campo elétrico ambiente (E) e a ação de ventos neutros (U) e com isto, muitas das características do ESF podem agora ser explicadas pela denominada teoria RT generalizada (GRT). Um perfil vertical típico da Ionosfera Equatorial para o período do pôr-do-sol é apresentado na Figura 4.2.

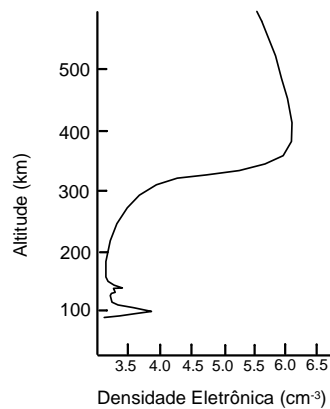


FIGURA 4.2 - Perfil vertical típico da Ionosfera equatorial para o período do pôr-do-sol.  
FONTE: Adaptado de Baumjohann e Treumann (1997, p. 63), retirada da dissertação Rodrigues, 2003.

É possível observar um acentuado gradiente de densidade na porção inferior da camada F separando duas regiões distintas: uma de baixa densidade e outra, de alta densidade, localizadas respectivamente abaixo e acima de aproximadamente 300 km de altura. Em termos didáticos faz-se uma analogia deste perfil com o caso da instabilidade hidrodinâmica RT, no qual um fluido mais denso é sustentado por um fluido menos denso. Na instabilidade hidrodinâmica RT uma pequena perturbação surge na superfície de contato dos dois fluidos e com o auxílio da gravidade, esta perturbação evolui até que o fluido menos denso tende a se elevar enquanto que o fluido mais denso desce como ilustrado na Figura 4.3.



FIGURA 4.3 – Ilustração da Teoria da instabilidade hidrodinâmica RT,  
FONTE: Kelley (1989, pag. 76 e 122) retirada da dissertação Rodrigues, 2003.

Contudo, o processo de instabilidade RT generalizada o qual se aplica à Ionosfera não é tão simples como ilustra a Figura 2.3. Processos eletrodinâmicos intrínsecos da Ionosfera equatorial e de médias latitudes, assim como efeitos de acoplamento Ionosfera-magnetosfera em altas latitudes controlam o processo de geração e evolução das irregularidades ionosféricas (Fejer, 1996, Aarons, 1991).

Acredita-se que as condições necessárias para a ocorrência de irregularidades de larga-escala são: 1) presença de uma perturbação inicial de larga-escala, 2) um gradiente direcionado para cima, do perfil de densidade eletrônica da Ionosfera e 3) um aumento do campo elétrico para leste. O início do ESF pode também ser afetado por perturbações de campo elétrico originadas em altas latitudes durante condições magneticamente perturbadas. Existem ainda vários processos tais como ventos neutros meridionais e condutividade das camadas E conjugadas, que podem inibir o crescimento das irregularidades. O grande número de efeitos potencialmente importantes faz com que os termos de variabilidade dia-a-dia constituam os problemas a serem mais analisados no estudo do ESF (Fejer, 1996; Batista et al., 1999; Abdu, 2001) (Rodrigues, 2003).

### **4.3 Anomalia de Appleton**

Uma característica da região-F ionosférica em baixas latitudes, aproximadamente entre 20° Sul e 20° Norte, é a Anomalia Equatorial ou Anomalia de Appleton. Esta região possui uma alta densidade eletrônica devido à deriva vertical  $E \times B$  do plasma nessa camada ionosférica (Muralikrishna et al; 2003).

A interpretação teórica da anomalia Equatorial é dada geralmente nos termos “do efeito fonte” - o campo elétrico zonal existente na Ionosfera equatorial é dirigido para leste durante o dia, criando uma deriva vertical  $E \times B/B^2$ . Logo após o pôr-do-sol, este campo elétrico dirigido para leste é acentuado (pico pré-reversão) e o plasma da região F deriva até elevadas altitudes. Enquanto isso, o plasma de baixas altitudes decai rapidamente devido à diminuição da intensidade de radiação solar incidente (Kelley, 1989). Quando uma determinada altitude é alcançada, devido à ação do gradiente de pressão e da gravidade, o



plasma inicia um movimento de descida ao longo das linhas do campo geomagnético conduzindo às baixas latitudes como se fosse o fluxo de uma fonte (Muralikrishna et al; 2003).

#### **4.4 A Teoria do Dínamo Atmosférico**

Segundo Rishbet e Garriot (1969), a teoria do dínamo explica o surgimento de campos elétricos e correntes na Atmosfera e seu mecanismo pode ser resumido da seguinte forma: O Sol e a Lua produzem forças de marés na Atmosfera, causando movimentos de gases neutros da Atmosfera que, em primeira ordem, podem ser considerados movimentos horizontais. Os movimentos destes gases neutros através das linhas de campo geomagnético produzem correntes em níveis onde a condutividade elétrica é apreciável, camada E. Devido às variações horizontais e verticais de condutividade, as correntes não podem fluir livremente em todas as direções. Desta forma, assim são geradas cargas de polarização que, por sua vez, modificam o fluxo de corrente. Os campos eletrostáticos associados com estas cargas são transmitidos à região F equatorial, através das linhas de campo magnéticas que são altamente condutoras. Na região F, estes campos eletrostáticos dão origem às derivas eletrostáticas,  $E \times B$ , (Rodrigues, 2003).

## CAPÍTULO 5

### O SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)

#### 5.1 Introdução

O Sistema de Posicionamento Global ou GPS (abreviação do inglês “Global Positioning System”) teve início em 1958 quando os americanos lançaram o satélite Vanguard tendo assim o início do desenvolvimento do sistema Navstar (Navigation satellite with Timing and Ranging). A partir de 1967 foi liberado para uso civil, o sistema denominado Navy Navigation Satellite System (NNSS) também chamado de Transit. Em 1973, iniciou-se o desenvolvimento do Global Positioning System (GPS), projetado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (EUA). O sistema GPS entrou em operação em 1991 e em 1993 a constelação dos satélites utilizados pelo sistema foi concluída (LETHAM, 1996).

#### 5.2 Estrutura do Sistema GPS

O GPS é um sistema de rádio navegação, que utiliza satélites artificiais para determinar a posição de um objeto, fixa ou móvel, situado em qualquer ponto sobre a superfície terrestre. Os primeiros protótipos (Bloco I) foram lançados entre 1978 e 1985, totalizando 11 satélites dispostos em dois planos orbitais com 63° de elevação (Seeber, 1993), sendo que quatro ou mais satélites pudessem ser observados durante uma considerável fração do dia numa mesma região (Beutler, 1995). Em 1989 para fazer parte da primeira constelação operacional, foram lançados os primeiros satélites do Bloco II, constituindo no total 24 (Blocos I, II, IIA) satélites, distribuídos em 6 rotas orbitais com inclinação de 55°. Em dezembro de 1993 foi declarada a capacidade operacional do sistema. Atualmente a constelação é formada no total por 28 satélites (Blocos I, II, IIA, IIR) (USNO, 2003a).

Os satélites constituem o segmento espacial do sistema e estão dispostos em órbitas circulares, em uma altitude de aproximadamente 20.200 km e com período orbital de 12 horas siderais (Beutler, 1995). Isto significa que a posição do satélite se repete, a cada dia, com 4 minutos de adiantamento em relação ao dia anterior (FEDRIZZI, 1999).

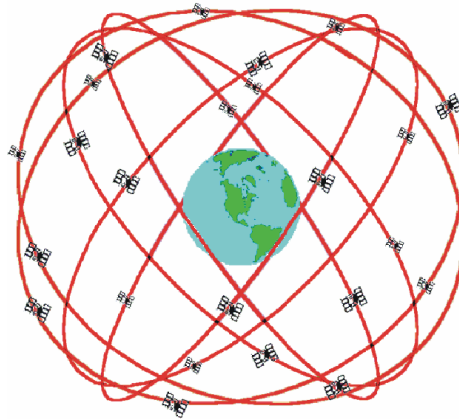


FIGURA 5.1 – Constelação de satélites do sistema GPS.

FONTE: Adaptado de <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textogps.pdf>.

### 5.3 Posicionamento

O sistema GPS foi desenvolvido fundamentalmente com o objetivo de fornecer um posicionamento entre satélite e receptor. O processo para determinação destas medidas é baseado no tempo de propagação do sinal enviado pelo satélite, desde o instante da emissão até o momento de sua chegada no receptor. Admitindo-se que os relógios dos satélites e receptores estivessem perfeitamente sincronizados com o tempo GPS. O tempo de propagação deste sinal corresponderia à distância geométrica entre o satélite e o receptor. Todavia, os relógios dos receptores, por serem menos precisos, apresentam uma pequena diferença em relação ao tempo GPS e, apesar da precisão dos osciladores atômicos instalados a bordo dos satélites, periodicamente são efetuados ajustes em seus relógios. Isto significa que as distâncias obtidas através do sistema GPS não correspondem às distâncias reais entre satélites e receptores, pois em ambos, os relógios estão defasados em relação ao sistema de tempo do GPS. Estas medidas incorretas de distância recebem, portanto, o nome

de pseudo-distâncias (“pseudoranges”). Além do atraso dos relógios, estão incluídos nas medidas de pseudo-distância os erros devido à propagação e à limitação na precisão do sinal GPS e os erros relacionados aos receptores e satélites.

O posicionamento do receptor em um referencial tridimensional ocorre, aproximadamente, da seguinte forma: considerando-se que o receptor esteja situado a uma distância  $R$  de um determinado satélite e os relógios dos satélites e receptores estejam perfeitamente sincronizados com o tempo GPS, é possível dizer que o receptor encontra-se em algum ponto sobre a superfície de uma esfera que envolve o satélite e cujo raio é igual a  $R$ . Entretanto, se o receptor estabelecer as distâncias relativas a dois satélites, então ele pode estar localizado em qualquer ponto sobre o círculo formado pela intersecção entre duas esferas. Adicionando-se um terceiro satélite, apenas dois pontos (um dos quais, fisicamente incorreto) resultam da intersecção entre três esferas.

Admitindo-se que os relógios estejam incorretos, a intersecção das esferas ocorrerá em pontos falsos. Todavia, a medida de um quarto satélite visível ao receptor elimina os erros de posicionamento devido à imprecisão dos relógios dos receptores (Hofmann-Wellenhof et al., 1994) (Fedrizzi, 1999).

#### **5.4 Características do sinal GPS**

Cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras, chamadas “Link 1” e “Link 2” ou L1 e L2 (Spilker Jr. e Parkinson, 1996). Estas duas portadoras são geradas simultaneamente a partir de uma frequência fundamental de 10,23 MHz. L1 e L2 correspondem à frequência fundamental multiplicada por 154 e 120, respectivamente. Desta forma, L1 corresponde à frequência de 1,57542 GHz, enquanto que L2 corresponde a 1,22760 GHz.

Os satélites também emitem uma mensagem de navegação, onde podem ser identificados através de um número relacionado a um segmento particular do código pseudo-aleatório (“Pseudo Random Noise - PRN”), definido a partir de uma sequência de códigos modulados sobre as portadoras, que é atribuído sobre cada uma das portadoras L1 e L2. A modulação de códigos permite realizar medidas de distâncias a partir da estimativa do

tempo de propagação da modulação Os códigos são reconhecidos através de uma seqüência de valores binários (0 e 1, ou +1 e -1).

A modulação é feita por um deslocamento de  $180^\circ$  na fase da portadora quando ocorre a mudança de estado (“biphase modulation”) (Rodrigues, 2003). Ver Figura 5.2.

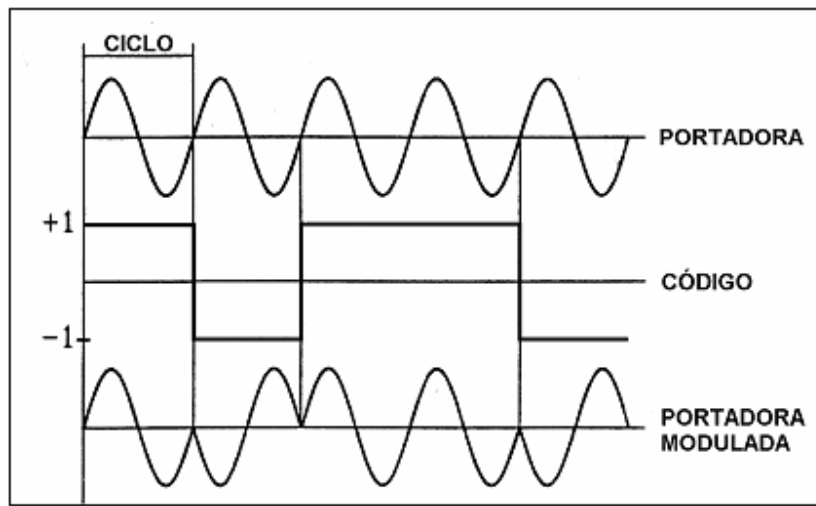


FIGURA 5.2 - Modulação do código sobre a onda portadora.

FONTE: Hofmann-Wellenhof et al. (1994, p. 77), retirada da dissertação de Fedrizzi, 1999.

Dois códigos formam a seqüência PRN: O código C/A (“Coarse/Aquisition” ou “Clear/Access”) que possui uma freqüência de 1,023 MHz e é repetido a cada milissegundo e o código P (“Precision” ou “Protection”) que possui freqüência de 10,23 MHz e são repetidos aproximadamente cada 266,4 dias. Existe ainda o código W utilizado para criptografar o código P, transformando-o no código Y, não disponível aos usuários civis. A criptografia do código P só é utilizada quando o procedimento “Anti-Spoofing” (AS) é acionado. O objetivo principal do AS é evitar que o código P seja fraudado, mediante a geração de uma réplica do mesmo. Já a mensagem de navegação consiste de 1500 bits transmitidos em 30 segundos e que contém informações sobre o relógio do satélite, a sua órbita, suas condições operacionais e outras informações. Pode-se observar que existem três tipos de sinais envolvidos no GPS: as portadoras (L1 e L2), os códigos C/A e P(Y) e a

mensagem de navegação (D). Esta estrutura permite medir a fase da portadora e sua variação e o tempo de propagação da modulação.

As portadoras moduladas podem ser representadas pelas seguintes equações:

$$L1(t) = a_1 P(t) D(t) \cos[\omega_1 t + \phi(t)] + a_1 C/A(t) D(t) \sin[\omega_1 t + \phi(t)] \quad 5.1$$

e

$$L2(t) = a_2 P(t) D(t) \cos[\omega_2 t + \phi(t)] \quad 5.2$$

onde  $\cos[\omega_i t + \phi(t)]$  é a portadora não modulada,  $D(t)$  contém a mensagem de navegação,  $P(t)$  e  $C/A(t)$  representam as seqüências de pulsos dos códigos P e C/A, respectivamente. O termo  $a_1 C/A(t) D(t) \sin[\omega_1 t + \phi(t)]$  indica que o código C/A é modulado em quadratura de fase (deslocamento de 90º) com o código P(t). O índice  $i=1,2$  representa a portadora L1 ou L2,  $\omega_i$  é a frequência angular da portadora e  $\phi(t)$  é o ruído da fase.

Todos os satélites transmitem em mesma frequência e utilizam a técnica CDMA (“Code Division Multiple Access”) na qual cada satélite é identificado pelo seu código característico. Além disso, o sinal é espalhado em frequência (“spread spectrum”) de forma a evitar efeitos de interferência eletromagnética (Rodrigues, 2003).

## 5.5 Receptores

Atualmente, existem diversos tipos de receptores que possuem características próprias e são utilizados em áreas específicas, tais como navegação, geodésia, atividades militares, entre outras. Apesar desta diversidade de equipamentos, os receptores em geral são compostos basicamente pelos seguintes elementos (Seeber, 1993), como mostrado na Figura 5.3.

- antena com pré-amplificador
- seção de rádio frequência (RF)
- oscilador de precisão

- dispositivo de armazenamento
- microprocessador
- interface para o usuário (painel de visualização e controle)
- fonte de energia

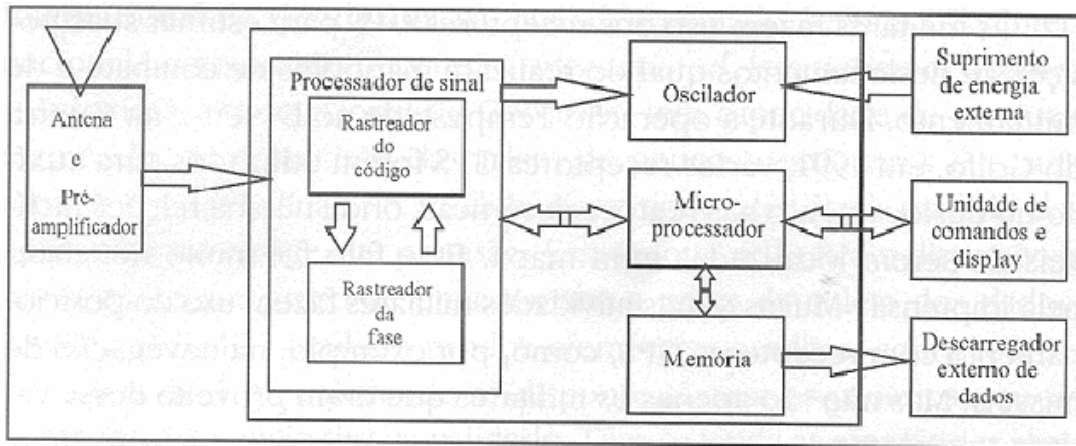


FIGURA 5.3 - Esquema de recepção do sinal GPS.

FONTE: Adaptado de <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textogps.pdf>

Uma antena detecta os sinais dos satélites que são amplificados e filtrados para eliminar a maior quantidade possível de interferências. Em geral, os receptores utilizam uma antena onidirecional hemisférica, cujo diagrama de radiação permite a recepção do sinal em todas as elevações e azimutes do hemisfério visível. O sinal é enviado, posteriormente, à seção de rádio frequência e processado em um ou mais canais, de acordo com o tipo de receptor. Alguns receptores podem sintonizar quatro ou mais satélites simultaneamente, enquanto outros fazem um rastreamento alternado entre os satélites. A seção de rádio frequência é formada por osciladores (onde é gerada a frequência de referência), multiplicadores, filtros e misturadores. A frequência de referência é controlada por osciladores de cristal quartzo, menos precisos do que os osciladores atômicos dos satélites, denominados osciladores de precisão. Os dados recebidos (observáveis e mensagens de navegação) devem estar constantemente disponíveis para um posterior processamento e, por este motivo, um dispositivo de armazenamento torna-se necessário. Alguns receptores têm memórias internas ou armazenam os dados em fitas magnéticas. Todavia, os dados podem ser

gravados diretamente em micro-computadores conectados ao receptor. As operações do receptor, tais como aquisição e processamento dos sinais, decodificação das mensagens transmitidas e cálculos de posição e velocidade, são controladas pelo microprocessador.

A comunicação entre o receptor e o usuário é estabelecida por meio de um painel de visualização e controle e o fornecimento de energia para o funcionamento dos receptores pode ocorrer através de baterias internas recarregáveis ou fontes externas, conforme o período de tempo de utilização e tipo de receptor.

## 5.6 Aplicações

Foi desenvolvido inicialmente para atender às necessidades militares, porém com o passar dos anos vem ocupando um espaço crescente em diversas aplicações da área civil.

Atualmente o GPS tem um elevado número de aplicações em várias áreas, entre os quais podemos citar:

- Orientação de navegação aérea e marítima;
- Determinação de órbita e posição de outros satélites;
- Agricultura de precisão;
- Exploração de petróleo;
- Telecomunicações;
- Obtenção de medidas ionosféricas;

Além dessas aplicações, qualquer pessoa que queira saber sua posição, conhecendo a velocidade e direção de seu deslocamento, pode fazer uso deste sistema. Todavia, existem aplicações onde a precisão torna-se um fator crítico e o efeito da degradação do sinal pode ser minimizado através da utilização do GPS Diferencial (“Differential GPS” - DGPS).



## CAPÍTULO 6

### EFEITOS DA IONOSFERA NO SINAL GPS

#### 6.1 Introdução

A Ionosfera representa a maior fonte de erro para o Sistema de Posicionamento Global – GPS fato esse decorrência da natureza dispersiva da Ionosfera (Smita et al; 2005) e existe uma relação direta entre a velocidade de propagação da onda eletromagnética e sua frequência como ilustrado na Figura 6.1.

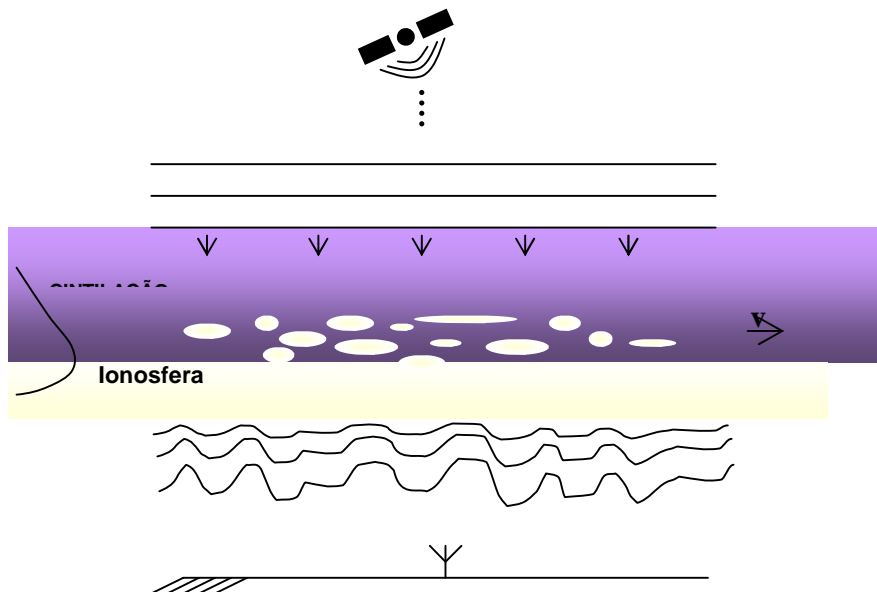


FIGURA 6.1 – Ilustração da cintilação do sinal ao passar a camada Ionosférica.  
Fonte: Comunicação pessoal do Dr. E. R. de Paula.

Os principais efeitos desta região Atmosférica sobre os sinais do GPS são: o atraso de grupo na modulação do sinal, o avanço na fase portadora, o deslocamento Doppler, a rotação da polaridade do sinal, a refração da onda de rádio, a distorção na forma de onda do pulso, a cintilação da fase do sinal, o desvanecimento e a cintilação da amplitude do sinal (Klobuchar, 1996).

## 6.2 Cintilações ionosféricas

Em 1946 foram observadas, pela primeira vez, flutuações irregulares de curto período de tempo na intensidade da radiação na banda de rádio (64 MHz) emitida pela estrela Cygnus (Hey et al; 1946). Inicialmente, considerou-se que as flutuações eram inerentes à fonte de emissão. Observações posteriores indicaram que não existia correlação entre flutuações registradas em duas estações espaçadas 210 km, enquanto que se observou boa correlação para uma separação de 4 km. Isto sugeriu que o fenômeno seria produzido localmente, provavelmente pela atmosfera terrestre. Observações subseqüentes confirmaram as especulações e isto marcou a primeira observação do fenômeno de cintilação ionosférica (Rodrigues, 2003). As cintilações ionosféricas são flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, causadas por irregularidades na densidade eletrônica da Ionosfera. (Smita et al; 2005).

Após o lançamento do primeiro satélite artificial em 1957, tornou-se possível observar cintilações ionosféricas em sinais emitidos por rádio-transmissores a bordo de satélites. O interesse no estudo deste fenômeno tem continuado com dois objetivos principais, um científico e outro prático. Do ponto de vista científico, os dados de cintilação fornecem informações sobre a ocorrência das irregularidades ionosféricas, cuja climatologia ainda não é totalmente compreendida. Do ponto de vista prático, o estudo da cintilação está diretamente relacionado a problemas de estabilidade de enlaces de comunicação e navegação por satélite (Rodrigues, 2003).

De acordo com Rodrigues (2003), o estudo de teorias que explicassem as cintilações iniciou com a consideração de que o meio pelo qual o sinal de rádio se propaga seria equivalente à uma tela de difração, “diffracting screen”, com irregularidades aleatórias de densidade que

não se deformam e que se movem com direção e velocidade fixas. Se a região de difração é suficientemente fina, as variações na frente de onda emergente estarão presentes somente na fase e não na amplitude do sinal. À medida que a onda se propaga além da região de difração, as flutuações em amplitude começam então a surgir.

Inicialmente, esta aproximação foi utilizada em diversos casos tais como os de uma tela de difração unidimensional e de uma tela de difração bidimensional. Logo em seguida, considerou-se o caso de uma tela de difração espessa tri-dimensional. Referências de trabalhos que consideraram diferentes aproximações para a tela de difração podem ser encontradas no Apêndice A de Kelley (1989). Os casos prévios foram então revistos por Salpeter (1967) que estendeu a teoria a importantes regimes que não haviam sido considerados e derivou condições suficientes para validação da aproximação de uma tela fina de difração, “thin phase screen”.

Para o caso de espalhamento fraco causado por uma tela fina de difração, o espectro de potência das flutuações de densidade deve ser multiplicado por uma função que depende da altura da camada de irregularidades e da frequência da onda incidente o que produziria o espectro de potência das cintilações observadas. Sob estas aproximações, o espectro de potência da cintilação é uma versão linearmente filtrada do espectro de potência das flutuações de densidade. A função multiplicadora, conhecida como filtro de Fresnel age como um filtro passa alta (Kelley, 1989) e apresenta mínimos em pontos proporcionais à raiz quadrada de números inteiros de frequência. Recentemente, Bhattacharyya et al. (2001) encontrou tais mínimos de Fresnel, em espectros de potência de cintilações em sinais VHF. Os mínimos de Fresnel não são observados quando a camada de irregularidades é espessa. Matematicamente a teoria das cintilações é amplamente demonstrada em Yeh e Liu (1982). Já sobre cintilações com enfoque à sua aplicação no estudo das irregularidades ionosféricas pode ser encontrada em Aarons (1982). É importante salientar que a maioria das teorias considera apenas o caso de espalhamento fraco. Teorias para explicar matematicamente o caso de espalhamento forte ainda estão em desenvolvimento.

### 6.3 O Índice de cintilação ( $S_4$ )

O índice de cintilação  $S_4$  tem sido amplamente utilizado para quantificar a magnitude das cintilações em amplitude de sinais transionosféricos e é definido em termos da intensidade ( $I$ ) do sinal recebido, como mostra a Equação (6.1), (Yeh e Liu, 1982):

$$S_4^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad 6.1$$

É possível mostrar, a partir da Teoria para Cintilação Fraca, que o índice  $S_4$  está relacionado ao desvio de densidade do plasma ionosférico ( $\Delta N$ ) ao longo do caminho de propagação do sinal e à espessura da camada de irregularidades ionosféricas ( $L$ ), pela seguinte expressão (Yeh e Liu, 1982):

$$S_4^2 \cong 8\pi^2 r_e^2 \lambda^2 L \iint \left[ 1 - \frac{2k}{k_{\perp}^2 L} \sin\left(\frac{k_{\perp}^2 L}{2k}\right) \cos\left(\frac{k_{\perp}^2}{k} \left(k - \frac{L}{2}\right)\right) \right] \Phi_{\Delta N}(\vec{k}_{\perp}, 0) d^2 k_{\perp} \quad 6.2$$

Onde  $r$  é o raio do elétron,  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal e  $\Phi_{\Delta N}(\vec{k}_{\perp}, 0)$  é o espectro tridimensional da flutuação de densidade  $\Delta N$  com  $k_z = 0$  e  $k_{\perp}$  está na direção perpendicular à propagação da onda. A integral na Equação (6.2) indica que a contribuição para a cintilação, das irregularidades de diversos números de onda ( $k$ ), é ponderada por uma função filtro espacial, isto é, a expressão em colchetes na Equação (6.2).

A Equação (6.2) não é facilmente interpretável e trabalhos de modelagem das cintilações, como o realizado por Basu e Basu (1980) apresenta equações mais simples nas quais, tanto as cintilações em amplitude quanto em fase são expressas em quantidades que podem ser obtidas experimentalmente. Contudo, apesar de explicarem muitas das características das

cintilações, estas equações não podem explicar fenômenos mais complexos observados e, por esta razão, modelos computacionais têm sido desenvolvidos (por exemplo, Fremouw e Secan, 1984; Secan et al., 1995). Fremouw e Secan (1984) já incluem o efeito de foco que ocorre nas cintilações e que dá origem a valores de  $S_4 > 1$  (Singleton, 1970).

A Equação (6.3) abaixo foi utilizada por Basu e Basu (1980) para modelagem das cintilações equatoriais e inclui os principais parâmetros responsáveis pela cintilação em amplitude.

$$S_4^2 = 8\pi^2 (r_e \lambda)^2 L \sec\theta < \Delta N^2 > \frac{\lambda z \sec\theta}{4\pi} k_o F \quad (6.3)$$

Além da dependência do  $S_4$  com relação ao desvio RMS médio ( $\Delta N$ ) de densidade, ao longo do caminho de propagação do sinal, e com relação à espessura da camada de irregularidades ( $L$ ), Basu e Basu (1980) também deixaram evidente a dependência do índice  $S_4$  com relação à altura ( $z$ ) da camada, ao ângulo de zênite ( $\theta$ ) do sinal na altura da camada de irregularidades e ao comprimento de onda do sinal ( $\lambda$ ).  $F$  é um fator relacionado à geometria das irregularidades e  $k_o$  se refere ao menor número de onda que contribui para a cintilação.

De acordo com Kintner et al. (2001), a magnitude da cintilação depende da distribuição espacial e da amplitude das irregularidades de densidade. Contudo, a escala de tempo do desvanecimento (“fading”) depende da velocidade das irregularidades e de uma escala espacial conhecida como comprimento de Fresnel, o qual, em primeira ordem, depende somente do comprimento de onda do sinal GPS e da distância às irregularidades ionosféricas. A escala de Fresnel tem origem no filtro de Fresnel.

De acordo com Salpeter (1967), para o caso de espalhamento fraco, o espectro de potência horizontal da intensidade do sinal tem a seguinte forma:

$$\varphi_1(k) = 4\Phi_\varphi(k) \sin^2 \left( \frac{k^2 r_F^2}{4\pi} \right) \quad (6.4)$$

onde  $k$  é o número de onda horizontal,  $r_F$  é o comprimento de Fresnel ( $r_F = \sqrt{\lambda d}$ , onde  $d$  é a distância até a camada espalhadora e  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal), e  $\Phi_\varphi(k)$  é a densidade espectral de potência das irregularidades que causam o espalhamento. Tipicamente,  $\Phi_\varphi(k)$  decresce rapidamente com o aumento de  $k$  (Basu e Basu, 1993), de forma que o primeiro máximo na função  $\sin^2$  domina o espectro de potência. Isto significa que o espectro de potência mostrará um número de onda dominante dado por:

$$k = \frac{\sqrt{2\pi}}{r_F} \quad (6.5)$$

Ou,

$$\lambda_F = \sqrt{2} r_F \quad (6.6a)$$

Mas como  $r_F = \sqrt{\lambda d}$ , tem-se que:

$$\lambda_F = \sqrt{2\lambda d} \quad (6.6b)$$

Considerando que a camada de irregularidades se encontra a uma distância  $d = 350$  km e que o satélite encontra-se no zênite, pode-se dizer que as irregularidades que mais contribuem para a cintilação em sinais GPS ( $L1 = 1,57542$  GHz) são as irregularidades com escalas de tamanho de aproximadamente  $\lambda_F = 400$  metros.

#### 6.4 O Índice $S_4$ calculado pelos receptores SCINTMON

De acordo com Beach (1998), o procedimento computacional para o cálculo do  $S_4$  realizado pelo programa de redução de dados dos receptores SCINTMON, que serão realizados neste estudo, pode ser resumido da seguinte forma: utiliza-se um filtro passa-baixas com frequência de corte em 0,1 Hz, de modo a obterem-se valores médios locais do canal de

potência em banda larga  $P_k$  e do canal de ruído em banda larga  $N_k$ , onde  $k$  é o número da amostra numérica. Estes valores filtrados de  $P_k$  e  $N_k$  são denotados por  $\langle P \rangle_k$  e  $\langle N \rangle_k$ , respectivamente. Definiu-se então a variância da intensidade de sinal para o intervalo de um minuto a partir de:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (P_k - \langle P \rangle_k)(P_{k-1} - \langle P \rangle_{k-1}) \quad (6.7)$$

Onde  $M = 3000$  é o número de amostras por minuto enquanto que  $P_0$  e  $\langle P \rangle_0$  são definidos como os valores finais de potência e potência média do intervalo de 1 minuto anterior. Além disso, determina-se a potência média sobre o mesmo período a partir de:

$$\hat{S} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (\langle P \rangle_k - \langle N \rangle_k) \quad (6.8)$$

A partir destas definições o índice de cintilação para o, devido, intervalo de 1 minuto torna-se (Beach, 1998):

$$S_4 = \frac{\sqrt{\hat{\sigma}^2}}{\hat{S}} \quad (6.9)$$

Pode-se observar pela Equação (6.9) que o índice  $S_4$  também pode ser interpretado como o desvio padrão normalizado pela potência média do sinal. A Figura 6.2 mostra um exemplo de sinal amostrado por um receptor SCINTMON e os valores de  $S_4$  calculados para este caso. Observa-se que os valores de  $S_4$  aumentam à medida que a flutuação do sinal (cintilação) também aumenta. O índice  $S_4$  apresentado neste exemplo foi calculado por um dos receptores SCINTMON utilizados neste trabalho e que serão descritos posteriormente (Rodrigues, 2003).

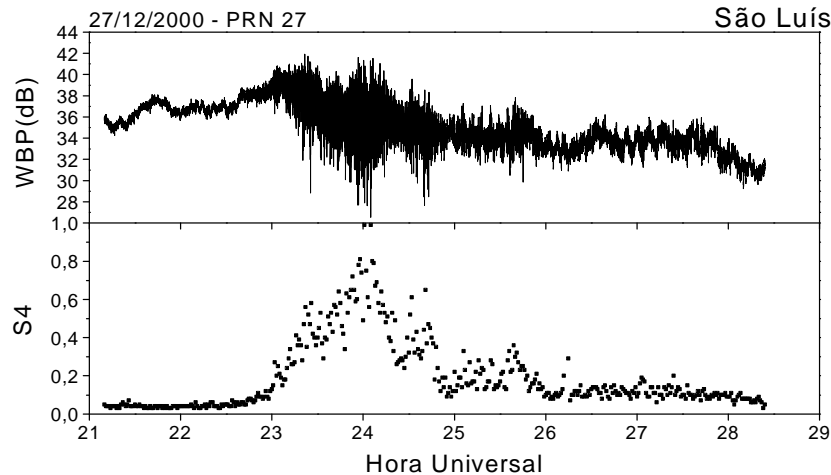


FIGURA 6.2 - Exemplo de cintilação e correspondentes valores de  $S_4$  calculados para intervalos de 1 minuto.

FONTE: Retirada da dissertação de Rodrigues, 2003.

### 6.5 Monitor de Cintilação Ionosférica – SCINTMON

Para investigar o ambiente onde ocorrem cintilações no sinal GPS, o grupo de pesquisadores Space Physics da Universidade de Cornell – E.U.A desenvolveu um receptor especializado do sinal GPS, denominado de Monitor de Cintilação Ionosférica – SCINTMON.

O SCINTMON é um software computacional desenvolvido a partir de um kit GEC Plessey Builder - 2™. Ele permite monitorar a frequência L1 transmitida pelo GPS, e é capaz de amostrar simultaneamente 11 satélites, porém somente coleta dados de satélites com uma elevação superior a 10°.

Atualmente, a Divisão de Aeronomia – DAE/INPE, em colaboração com a Universidade de Cornell, mantém 13 receptores GPS – SCINTMON instalados sobre o Território Brasileiro, como mostrado na figura 6.1. Esta rede de receptores SCINTMON tem sido ampliada e recentemente já foram instalados receptores em Boa Vista (Roraima), São João do Cariri (Paraíba), Presidente Prudente (SP) e Campinas (SP), os quais não estão mostrados na



Figura 6.3. A Tabela 6.1 mostra as coordenadas das estações GPS distribuídas no território brasileiro.

TABELA 6.1 - Coordenadas das estações GPS distribuídas no Território Brasileiro.

Station	Geog. Lat.	Geog. Long.	Magnetic Declination	Dip Lat.
S. Martinho da Serra	29,28° S	53,82° O	12,90° O	-18,57
S. J. dos Campos	23,07° S	45,86° O	20,03° O	-18,01
Cachoeira Paulista	22,57° S	45,01° O	20,54° O	-18,12
Palmas	26,36° S	51,98° O	15,36° O	-17,27
Cuiabá	15,45° S	56,07° O	14,98° O	-6,1
São Luís	02,57° S	44,2° O	20,74° O	-1,3
Manaus	03,08° S	59,97° O	13,96° O	+5,79

FONTE: <http://www.dae.inpe.br/iono/iongps/mapPort.html>.



FIGURA 6.3 - Disposição dos 13 receptores GPS instalados em 8 pontos sobre o Território Brasileiro.

FONTE: <http://www.dae.inpe.br/iono/iongps/mapPort.html>.

O programa é executado em ambiente DOS e permite ao usuário definir um modo de operação no qual o sistema opera de forma automática. Recentemente foram instalados

receptores SCINTMON que rodam no ambiente Linux (CASCADE) e permitem visualização do  $S_4$  e outros parâmetros como azimute e elevação em tempo real. O usuário deve apenas definir os horários de início e fim de gravação de dados. Como as irregularidades formam-se no período do anoitecer e permanecem até aproximadamente meia-noite local, em períodos magneticamente calmos, e até em algumas vezes até o amanhecer, para períodos magneticamente perturbados, sendo feitas observações entre as 18h00min e 06h00min horas locais para todas as estações GPS brasileiras.

Cada período de observação gera dois arquivos:

- “fsl” que contém informações de amplitude do sinal recebido de todos os satélites rastreados;

-“n” que contém informações gerais sobre cada satélite rastreado.

A partir desses arquivos é gerado um terceiro arquivo sumário, que contém informações coletadas a cada um minuto sobre a posição de cada satélite, potência do sinal recebido e índice de cintilação “índice  $S_4$ ”, como também outras informações referentes ao sinal GPS. As Figuras 6.4 e 6.5 mostram a potência em banda larga (WBP) e o índice de cintilação  $S_4$  calculado a partir do WBP, respectivamente para a estação S e para 02 de janeiro de 2006.

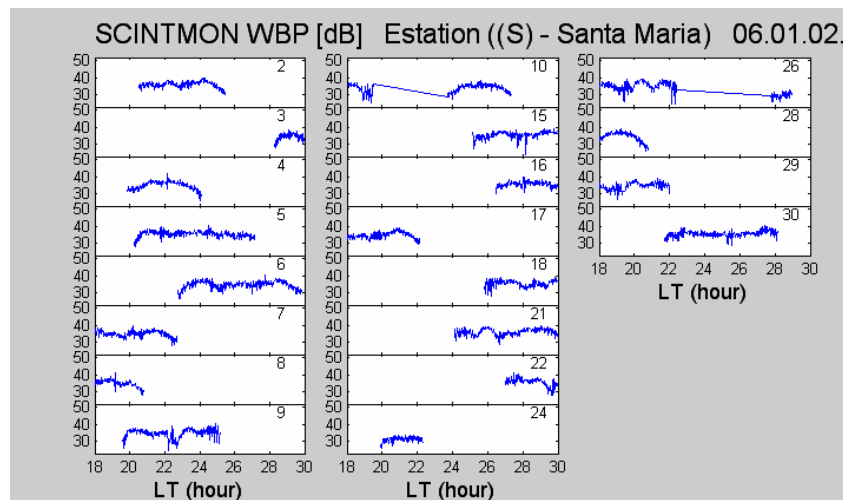


FIGURA 6.4 - Os painéis mostram os valores de potência em banda larga de sinal recebido, WBP em decibéis, para cada satélite rastreado na noite de 02/01/06 para 03/01/06, junto a Estação (S) – Santa Maria no Observatório Espacial do Sul do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE – MCT.

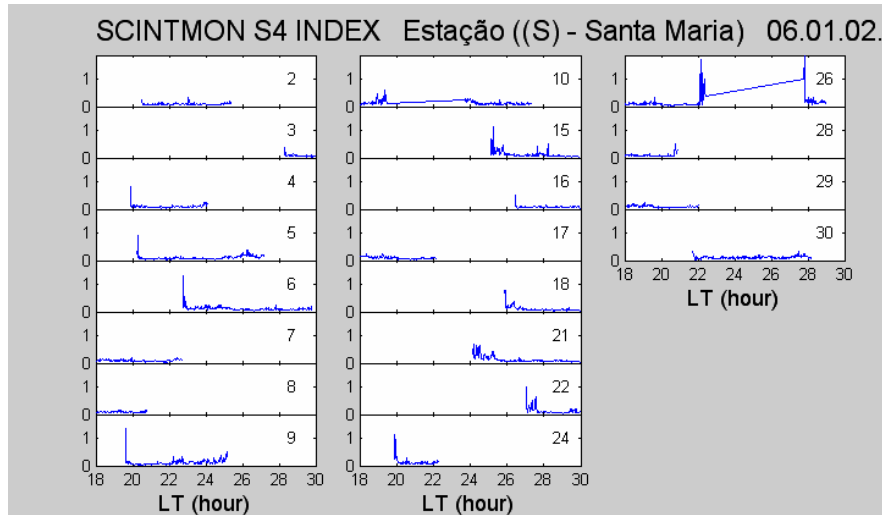


FIGURA 6.5 - Os painéis mostram os valores do índice  $S_4$ , calculados para os sinais mostrados na Figura 6.2. Valores de  $S_4$  acima de 0.2 estão associados a irregularidades, junto a Estação (S) – Santa Maria no Observatório Espacial do Sul do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE – MCT.

## **CAPÍTULO 7**

### **SISTEMA VHF**

#### **7.1 Introdução**

Desenvolvido pela empresa Americana SCION, o principal objetivo do sistema VHF é prever anomalias ionosféricas detectadas ao longo do equador magnético, reduzindo assim os impactos ionosféricos causados nas telecomunicações e, também, pesquisar os impactos causados pelas cintilações ionosféricas detectadas em sinais de satélites geo-estacionários. O sistema VHF compõe uma rede global de monitoração de cintilações eletromagnéticas presentes nos sinais dos satélites FLT-7 (0° latitude, -100° Longitude) e FLT-8 (0° latitude, -23° Longitude). No Brasil, temos três sistemas instalados estrategicamente, ao longo do equador magnético, nas cidades de Cuiabá-MT, Cachoeira Paulista-SP e São Luis-MA.

#### **7.1 Sistema VHF**

Este sistema recebe sinais VHF na banda L provenientes de satélites geo-estacionários e as cintilações monitoradas são detectadas em frequências na faixa compreendida entre 240 MHz e 260 MHz. Os dados recebidos são processados e enviados, em tempo real através de Internet, para o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e para o Laboratório de pesquisa de Sistemas RF em Impactos Ionosféricos da Força Aérea Americana na base aérea de Hanscom, Massachusetts. Cada sistema é composto por três módulos chamados de Conversor de RF, conversor de FI e um computador e multiplex que formam o módulo de processamento dos dados recebidos, e quatro antenas tipos Yagi posicionadas duas-a-duas, espaçadas a 100 metros, na direção leste-oeste magnética, ver Figura 7.1. O módulo RF com quatro canais, um para cada antena, ao receber os sinais RF provenientes dos satélites, mistura-os com o sinal do oscilador local de alto nível, amplifica-os e os envia para o

módulo de FI, onde são demodulados e as informações contendo os dados específicos às cintilações detectadas são extraídos. Esses dados após terem sido detectadas são enviados para o modulo de processamento que gera imagens digitais do índice de cintilação  $S_4$  e das velocidades leste-oeste das irregularidades do plasma ionosférico, como ilustrado na Figura 7.2.



FIGURA 7.1 - Antenas do tipo Yagi do Sistema VHF, instaladas no Observatório Espacial de São Luis – OESLZ/INPE – MCT, São Luis-MA.

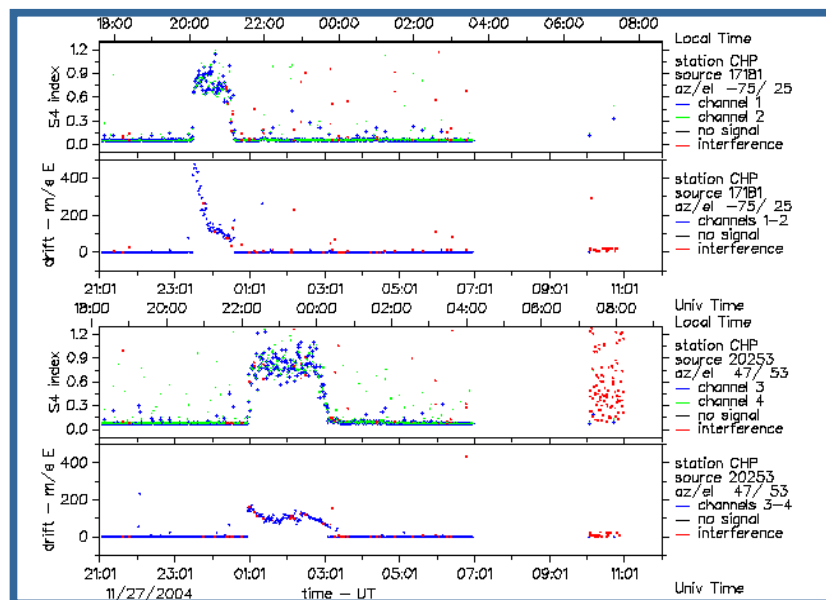


Figura 7.2 - Sinais processados com informações do Índice  $S_4$  e calculo da velocidade de deriva das cintilações detectadas em São Luis-MA.



Para o processamento dos dados utiliza-se um microcomputador dedicado exclusivamente ao Sistema VHF o qual se encontra instalado o sistema operacional Linux/debian para processamento em tempo real dos índices de cintilações observadas na região.

## CAPÍTULO 8

### CÁLCULO DA VELOCIDADE DE DERIVA ZONAL DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS

#### 8.1 Cálculo da velocidade de deriva zonal utilizando receptores espaçados de GPS

A velocidade de deriva das irregularidades utilizando este sistema é calculada a partir da correlação cruzada do padrão de cintilação medidos por dois receptores de GPS, os quais estão espaçados na direção leste-oeste magnética. Este algoritmo foi originalmente desenvolvido pela Universidade de Cornell, porém a sua versão atual sofreu algumas modificações e foi também adaptada pelo grupo de GPS do INPE para facilitar a sua operação através dos usuários. Este código foi desenvolvido em Matlab. Para o cálculo segue-se o seguinte cronograma: Depois de instalado um pacote com 9 programas, é seguido uma rotina para o cálculo da velocidade zonal. São extraídas informações sobre os arquivos sumários, e, posteriormente são gerados gráficos do índice  $S_4$  para cada satélite, através dos quais o usuário seleciona o período que ocorreu cintilação do sinal GPS, ou seja, quando o índice  $S_4$  for maior ou igual a 0.2, como ilustrado na Figura 8.1.

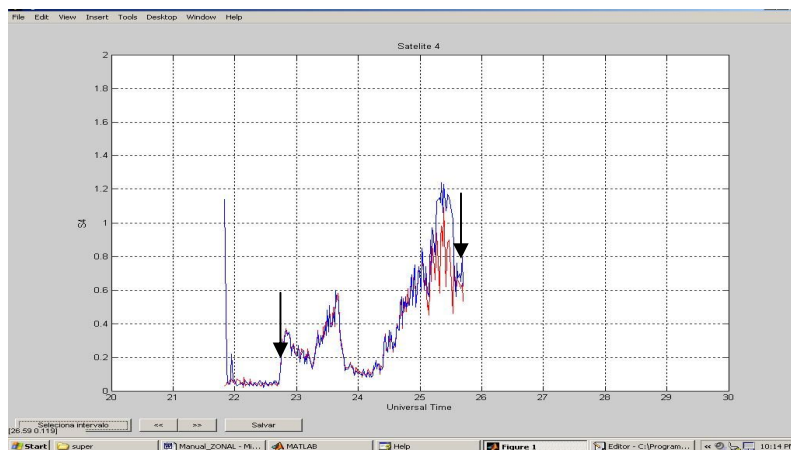


FIGURA 8.1 – Exemplo de gráficos de índice  $S_4$  durante o processamento do cálculo da velocidade zonal das irregularidades ionosféricas. As setas indicam onde deve ser feita a seleção do período.

Após a realização da seleção de intervalos começa a extração dos dados referentes aos intervalos selecionados. Posteriormente é verificada a qualidade dos dados selecionados para cada satélite. Se os dados não forem suficientemente bons serão descartados e não serão considerados no cálculo. Isto pode ocorrer devido a vários motivos, entre os quais podemos mencionar: seleção de intervalos em que houve “perda de lock” de um dos satélites, ruídos, dados não válidos para as condições estabelecidas no programa, como ângulo de elevação e índice de cintilação  $S_4$ . Os dados que não são descartados irão ser processados e posteriormente a velocidade deriva zonal é calculada e os gráficos com os valores de velocidade são plotados, como mostra a Figura 8.2.

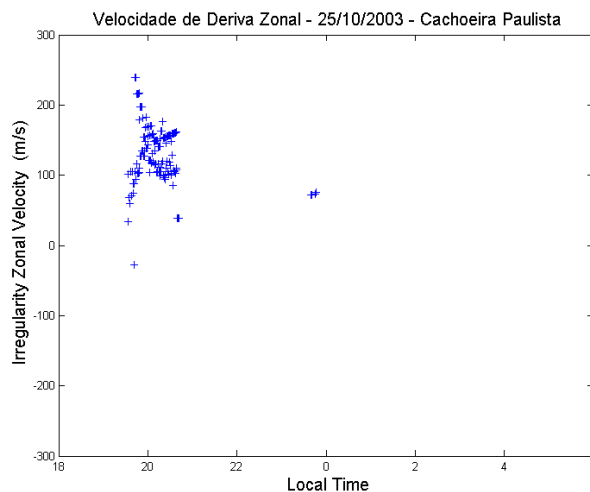


FIGURA 8.2 – Exemplo do cálculo da velocidade de deriva zonal das irregularidades ionosféricas para o dia 25/10/2003 sobre Cachoeira Paulista-SP, Brasil.

## 8.2 Cálculo da velocidade de deriva zonal utilizando receptores VHF

Para calcularmos a velocidade de deriva das irregularidades utilizando o sistema VHF utilizamos algoritmos em Matlab. Após a instalação desses softwares, seguido uma rotina, obtemos resultados do cálculo da velocidade zonal e plotamos os gráficos como ilustrado na Figura 8.3.



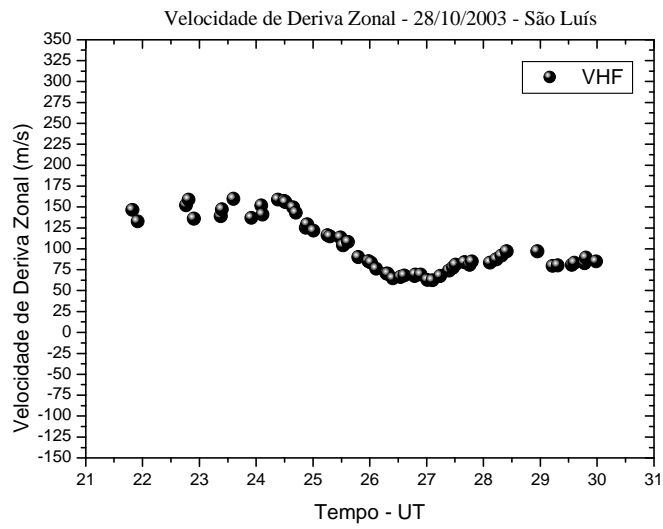


FIGURA 8.3 – Exemplo do cálculo da velocidade de deriva zonal das irregularidades ionosféricas para o dia 28/10/2003 na região sobre São Luís-MA, Brasil.

## CAPÍTULO 9

### METODOLOGIA, DADOS E RESULTADOS

#### 9.1 Metodologia

A Acadêmica realizou este Projeto de Pesquisa nas dependências do Prédio Sede do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE–MCT, em Santa Maria, RS, ver Figura 9.1, onde estão instaladas duas estações, S e T, do Sistema GPS, no âmbito da Parceria INPE – Cornell University.



FIGURA 9.1 – Prédio Sede do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE - MCT – localizado em Santa Maria - RS.

Para o estudo da velocidade de deriva zonal das irregularidades ionosféricas foram utilizados receptores espaçados de GPS. A velocidade de deriva das irregularidades é calculada a partir da correlação cruzada do padrão de cintilação medidos por dois receptores de GPS espaçados na direção leste-oeste magnética o que pode ser visto na seção 8.1. Após a geração de arquivos de texto contendo informações de velocidade por GPS são calculadas as médias das velocidades e posteriormente confeccionado os gráficos. Para o

cálculo da velocidade utilizando receptores de VHF o procedimento é semelhante ao realizado utilizando GPS e, também, já foi descrito na seção 8.2.

## 9.2 Dados

O Brasil é o único país do mundo que possui território ao norte e ao sul do equador geomagnético que, portanto, permite o estudo de estruturas alinhadas ao longo da mesma linha de campo magnético, como as bolhas de plasma, as quais são geradas na camada F no equador magnético. Estas bolhas se deslocam para leste e durante o seu desenvolvimento (crescimento) vertical a medida de sua velocidade zonal é contaminada pela componente vertical de deriva do plasma. Portanto, medidas das bolhas nas longitudes mais para leste serão bastante desejáveis para a previsão da geração das bolhas. A determinação da velocidade zonal das irregularidades utilizando receptores VHF (240 MHz e sinais recebidos de 2 satélites geoestacionários), com antenas espaçadas cerca de 100 m na direção leste-oeste magnética, permite sondar estruturas ionosféricas maiores (cerca de 930 m) do que as sondadas por GPS (cerca de 400 m), bem como permite comparar as velocidades zonal calculadas pelos 2 métodos. No Brasil, três sistemas VHF foram instalados estrategicamente de 01 de outubro a 10 de dezembro de 2002, ao longo do equador magnético, nas regiões de Campo Grande -MS, Cachimbo – PA e Boa Vista – AP, ver Figura 9.2, durante a campanha COPEX. Após esta campanha os receptores foram instalados em São Luís, Cuiabá e Cachoeira Paulista. (ver Figura 9.2). Neste trabalho analisamos dados de outubro de 2003 em São Luís e Cachoeira Paulista.

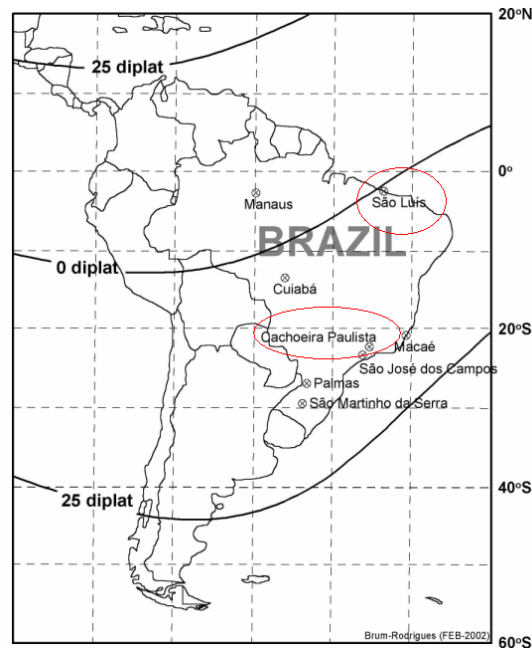


FIGURA 9.2 – Regiões do Território Brasileiro com receptores VHF e receptores espaçados GPS instalados para o estudo das irregularidades ionosféricas; Cachoeira Paulista-SP e São Luís-MA.

Durante o mês de outubro de 2003 observamos uma tempestade magnética registrada pelo índice Dst ( $Dst = -128 \text{ nT}$ ) para o dia 28, ver Figura 9.3.

Além da comparação da velocidade zonal determinada por 2 métodos (GPS e VHF), outro objetivo do projeto foi analisar o comportamento desta velocidade durante tempestades magnéticas. Analisando os dados dos índices geomagnéticos observamos que uma tempestade magnética registrada pelo índice Dst ( $Dst = -128 \text{ nT}$ ) ocorreu nos dias 28 a 31 de outubro de 2003 (ver Figura 9.3).

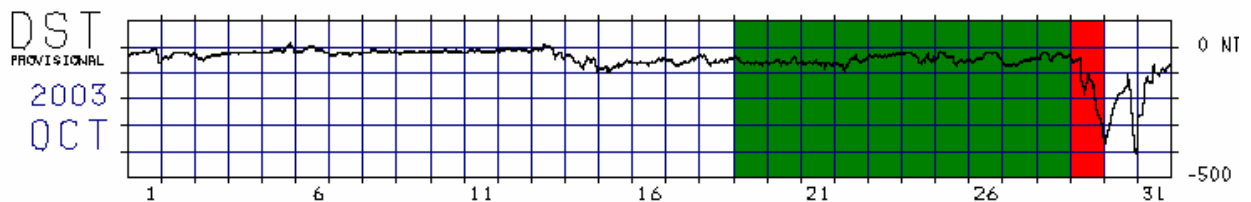


FIGURA 9.3 - Gráfico do índice Dst para o mês de outubro de 2003.  
FONTE: Adaptada de <http://www.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/dst1/prov>.

Para os dias 18 a 27 de outubro de 2003, dias geomagneticamente calmos, temos dados coletados para as 2 localidades (São Luís e Cachoeira Paulista). Para os dias geomagneticamente perturbados deste mês de outubro de 2003 citado acima temos também dados coletados. Os resultados são mostrados na seção 9.3 Resultados. Para os dias 18 a 27 de outubro de 2003, dias geomagneticamente calmos, temos dados coletados para as 2 localidades (São Luís e Cachoeira Paulista). Para o dia 28 de outubro de 2003, que foi geomagneticamente perturbado temos dados coletados simultaneamente apenas para Cachoeira Paulista. Os resultados são mostrados na seção 9.3.

### **9.3 Resultados**

Para comparar as velocidades zonais das irregularidades do plasma ionosférico calculadas pelos métodos dos receptores GPS e dos receptores de VHF espaçados na direção leste-oeste magnética determinamos as médias das velocidades para estes 2 métodos no período de 18 a 27 de outubro de 2003. Este foi um período de atividade magnética baixa. Os resultados obtidos estão mostrados nas Figuras 9.4 para São Luís e Figura 9.5 para Cachoeira Paulista. Observa-se na Figura 9.4 que no período anterior à meia noite as velocidades zonais determinadas por GPS foram consistentemente maiores do que as determinadas pelo VHF. Uma melhor concordância foi observada após meia noite. Como resultados obtivemos os seguintes gráficos mostrados nas Figuras: 9.4, 9.5 e 9.6 .

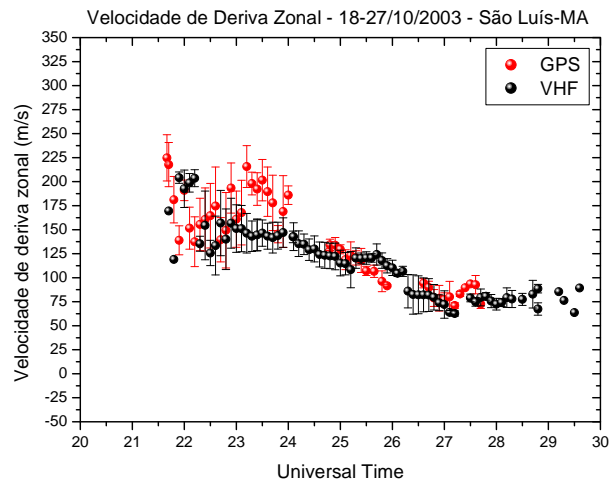


FIGURA 9.4 – Velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma para o período magneticamente calmo, 18-27 de outubro de 2003 para São Luís.

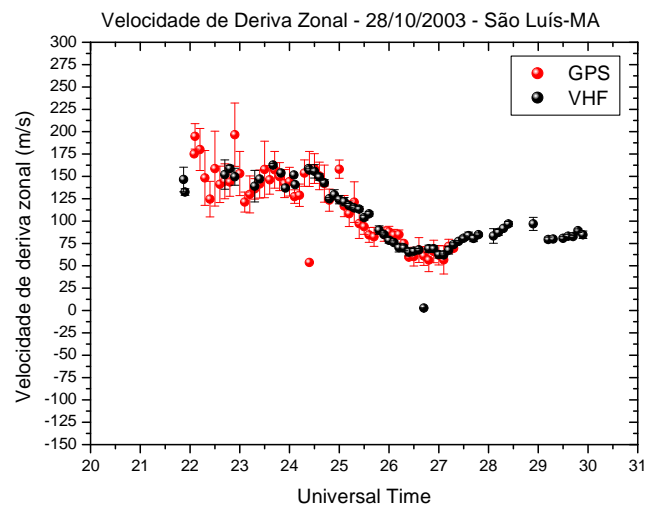


FIGURA 9.5 – Velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma para o dia magneticamente perturbado, 28 de outubro de 2003 para Cachoeira Paulista.

Para analisar o comportamento da velocidade zonal durante uma tempestade magnética muito intensa a velocidade zonal determinada pelos 2 métodos foi calculada para o dia 28

de outubro de 2003 (ver Figura 9.6). Surpreendentemente uma melhor concordância entre as velocidades foi encontrada.

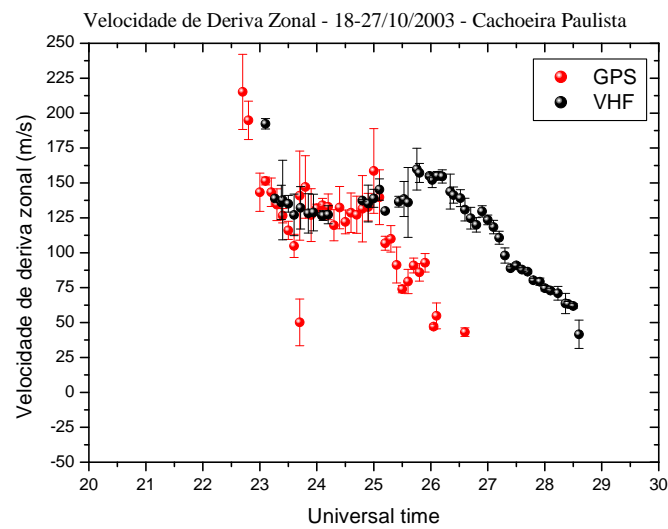


FIGURA 9.6 – Velocidade zonal das bolhas de plasma ionosféricas para o período magneticamente calmo, 18-27 de outubro de 2003.

## CAPÍTULO 10

### CONCLUSÃO

A deriva zonal do plasma da região F é produzida pelo campo elétrico vertical, sendo caracterizada por velocidades na direção leste durante o dia na direção oeste durante a noite. Essa deriva sofre influências principalmente dos campos elétricos de polarização da região F, sendo, portanto, influenciada diretamente pelos ventos termosféricos que geram estes campos. Portanto existe uma diferença no comportamento da deriva zonal entre períodos magneticamente perturbados e períodos magneticamente calmos. O Estudo da velocidade de deriva zonal das irregularidades ionosféricas utilizando receptores espaçados GPS e receptores VHF se mostrou importante. Foi observada uma boa concordância entre as velocidades zonais calculadas por estes 2 métodos. Notamos que a velocidade começa ser registrada aproximadamente a partir das 23 h UT e também percebemos que no decorrer do período noturno a velocidade de deriva média das bolhas ionosféricas decresce para valores bem inferiores ao registrado no início da noite.

No geral, através da análise dos gráficos podemos concluir que:

Foi observada uma boa concordância entre as velocidades de deriva zonal calculadas por estes 2 métodos em São Luís e em Cachoeira Paulista;

Verificamos o início do registro da velocidade para São Luís às 22 h UT e para Cachoeira Paulista às 23 h UT;

Foi observado que a velocidade de deriva zonal das irregularidades ionosféricas decai ao longo da noite de ~175 m/s para ~50 m/s;



Percebemos em São Luís uma modulação da velocidade a partir das 23 h UT;

Percebemos também, que para Cachoeira Paulista há um aumento da velocidade em torno da 25 h UT;

Para Cachoeira Paulista verificamos uma discrepância na velocidade a partir da 25 h UT;

No contexto do estudo da velocidade de deriva zonal das irregularidades ionosféricas, o Sistema GPS se mostrou um equipamento eficiente para a realização do estudo, por apresentar uma cobertura global da Ionosfera.

Entretanto este tipo de comparação entre as velocidades zonais determinadas por 2 métodos diferentes deve ser realizado para muitos outros períodos para se chegar a um resultado conclusivo. Muitos outros aspectos devem ser analisados tais como a localização dos setores da Ionosfera onde os receptores de GPS realizaram as medidas, a localização exata dos pontos onde o sinal do VHF fura a Ionosfera, os efeitos da velocidade de deriva vertical do plasma durante as horas de crescimento da bolha, pois a componente vertical da deriva pode contaminar a componente zonal da velocidade, o efeito do tamanho de escala das irregularidades do plasma na velocidade zonal, pois cada método é sensível a um tamanho de escala, entre outros fatores.

Mesmo com todas estas limitações nos métodos estudados os resultados obtidos neste trabalho dão contribuição ao cálculo da velocidade zonal das irregularidades, cujo conhecimento é importante para se prever a ocorrência de bolhas de plasma, bem como para entender os mecanismos físicos envolvidos. O desenvolvimento do Projeto de Iniciação Científica foi de muito proveito, pois possibilitou à acadêmica a realização de diversos estudos na área da Geofísica Espacial e Aeronomia, estudo o qual agregou conhecimento para esclarecer os mecanismos de geração, desenvolvimento e dinâmica desses fenômenos na Ionosfera e assim desenvolver o Projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarons, J. Global morphology of ionospheric scintillations. Proceedings of the IEEE, v. 70, n. 4, p. 360-378, Abr. 1982.
- Aarons, J. The role of the ring current in the generation or inhibition of equatorial F layer irregularities during magnetic storms. Radio Science, v. 26, n. 4, p. 1131-1149, Jul.-Aug. 1991.
- Aarons, J.; DasGupta, A. Equatorial scintillations during the major magnetic storm of April 1981. Radio Science, v. 19, n. 3, 731-739, 1984.
- Abdu, M. A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere – thermosphere electrodynamics relevant to spread F. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 63, n. 9, p. 869-884, Jun. 2001.
- Abdu, M. A.; Medeiros, R. T.; Sobral, J. H. A.; Bittencourt, J. A.; Spread F plasma bubble vertical rise velocities determined from spaced ionosonde observations. Journal of Geophysical Research, v. 88, n. A11, p. 9197-9204, 1983a.
- Abdu, M. A.; Sobral, J. H. A.; Batista, I. S. Equatorial spread F statistics in the American longitudes: some problems relevant to ESF description in the IRI scheme. Advances on Space Research, v. 25, n. 1, p. 113-124, 2000.
- Abdu, M. A.; Sobral, J. H. A.; Batista, I. S.; Rios, V. H.; Medina, C. Equatorial spread-F occurrence statistics in the American longitudes: diurnal, seasonal and solar cycle variations. Advances on Space Research, v. 22, n. 6, p. 851-854, 1998.
- Basu, S.; Basu, Su. Equatorial scintillations: a review. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 43, n. 5-6, p. 473-489, 1981.
- Beach T. L.; Kintner, P. M. Development and Use of a GPS Ionospheric Scintillation Monitor. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 39, n. 5, p. 918-928, May 2001.

- Beach, T. L. Global Positioning System Studies of Equatorial Scintillations. Ithaca. 335 p. Tese (Doutorado) - Cornell University, 1998.
- DasGupta, A.; Maitra A.; Das, S. K. Post-midnight scintillation activity in relation to geomagnetic disturbances. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 47, n. 8-10, 911-916, 1985.
- David N. Anderson, Bodo Reinisch, Cesar Valladare, Jorge Chau, Oscar Veliz. Forecasting the occurrence of ionospheric scintillation activity in the equatorial ionosphere on a day-to-day basis. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, n. 66, p. 1567-1572, 2004.
- de Paula E. R.; Kantor, I. J.; Sobral, J.H.A.; Takahashi, H.; Santana, D. C.; Gobbi, D.; de Medeiros, A. F.; Limiro, L. A. T.; Kil, H.; Kintner, P. M.; Taylor, M. J. Ionospheric irregularity zonal velocities over Cachoeira Paulista. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 64, n.12-14, p. 1511-1516, 2002a.
- de Paula, E. R. Resposta da região F ionosférica às tempestades magnéticas em baixas latitudes no Brasil. São José dos Campos. 210 p. (INPE-4106-TDL/259). Tese (Doutorado em Ciência Espacial) – Instituto de Pesquisas Espaciais, 1987.
- de Paula, E. R., Kantor, I. J., Sobral, J. H. A., Takahashi, H., Santana, D. C., Gobbi, D., Medeiros, A. F., Limiro, L. A. T., Kintner, P. M. and Taylor, M., 2002, Ionospheric irregularity zonal velocities over Cachoeira Paulista: *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 64, p1511-1516.
- de Paula, E. R.; Rodrigues, F. S.; Iyer, K. N.; Kantor, I. J.; Abdu, M. A.; Kintner, P. M.; Ledvina, B.; Kil, H. Equatorial anomaly effects on GPS scintillations in Brazil. *Advances on Space Research*, v.31, No. 3, 749-754,2003.
- Doherty, P. H.; Dehel, T.; Klobuchar, J. A.; Delay, S. H.; Datta-Barua, S.; de Paula, E. R.; Rodrigues, F. S. Ionospheric effects on low-latitude space based augmentation systems. In: ION GPS, Portland-Oregon, 2002. Proceedings: Institute of Navigation, 2002.
- Dungey, J. W. Convective diffusion in the equatorial F – region. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.9, n. 5-6, p. 304-310, 1956.

Fedrizzi, M. Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS. São José dos Campos. 123 p. (INPE-7259-TDI/703). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.

Fejer, B. G. Natural Ionospheric plasma waves. In: Kohl, H.; Ruster, R.; Schlegel, K. ed. Modern Ionospheric Science. Katlenburg-Lindau, European Geophysical Society, 1996. p. 216-273.

Fejer, B. G.; Sherliess L; de Paula, E. R. Effects of the vertical plasma drift velocity

G. A. Mansilla. Disturbances at F2-region heights of equatorial anomaly during geomagnetic storms. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 65, n. 9, p. 987-995, 2003.

Hargreaves, J. K. The solar-terrestrial environment. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

Kelley, M. C. The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics, San Diego: Academic Press, 1989. 484 p.

Kil H.; Kintner, P. M.; de Paula, E. R.; Kantor, I. J. Global Positioning System measurements of the ionospheric zonal velocity at Cachoeira Paulista in Brazil. Journal of Geophysical Research, v. 105, n. A3, p. 5317-5327, Mar. 2000.

Kil, H., Kintner, P. M., de Paula, E. R., and Kantor, I. J., 2000, Global Positioning System measurements of the ionospheric zonal apparent velocity at Cachoeira Paulista in Brazil: J. Geophys. Res, Vol. 105, p5317-5327.

Kil, H., Kintner, P. M., de Paula, E. R., and Kantor, I. J., 2002, Latitudinal variations of scintillation activity and zonal plasma drifts in South America: Radio Sci., Vol. 37, No. 1, p6 – 1-6 – 7.

- Kil, H.; Kintner, P. M.; Paula, E. R.; Kantor, I. J. Latitudinal variations of scintillation activity and zonal plasma drifts in South America. *Radio Science*, v. 37, n. 1, p. 6/1-6/7, 2002.
- Kintner, P. M.; Kil, H.; Beach, T. L.; de Paula, E. R. Fading timescales associated with GPS signals and potential consequences. *Radio Science*, v. 36, n. 4, p. 731-743, 2001.
- Klobuchar, J. A.; Doherty, P. H.; Bakry El-Arini, M.; Lejeune, R.; Dehel, T.; de Paula, E. R.; Rodrigues, F. S. Ionospheric issues for a SBAS in the Equatorial Region. In: *Ionospheric Effects Symposium, Alexandria, 2002. Proceedings: Alexandria: JMG Associates, 2002.*
- Kumar, S.; Gwal A. K. VHF ionospheric scintillations near the equatorial anomaly crest: solar and magnetic effects. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 62, n. 3, p. 157-167, Feb. 2000.
- Ledvina, B. M., Kintner, P. M., and de Paula, E. R., 2004, Understanding spaced-receiver zonal velocity estimation: *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, doi:10.1029/2004JA010489.
- M. Materassi, C. N. Mitchell and P. S. J. Spencer. Ionospheric imaging of the northern crest of the Equatorial Anomaly. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, n. 65, n.16-18, p. 1393-1400, 2003.
- Muella, M. T. A. H., E. R. de Paula, I. J. Kantor, I. S. Batista, M. A. Abdu, J. H. A. Sobral, L. F. C. de Rezende and K. M. Groves. GPS scintillations, TEC and Zonal Plasma Drifts observed during the COPEX 2002 campaign: Preliminary results. *Proceedings of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador, 2005. On the generation and evolution of equatorial spread F. Journal of Geophysical*
- R. Raghavarao, R. Suhasini, H.G. Mayr, W.R. Hoegy, L.E. Wharton. R. Raghavarao, R. Suhasini, H.G. Mayr, W.R. Hoegy, L.E. Wharton. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, n. 61, p. 607-617, 1999. *Research*, v. 104, n. A9, p. 19859-19869, 1999.

- Rodrigues, F. S. Estudo das Irregularidades Ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS: Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.
- Rodrigues, F. S.; de Paula, E. R.; Makita, K.; Abdu, M. A.; Sobral, J. H.; Iyer, K. N.; Monteiro, S.; Gobbi, D.; Takahashi, H.; Schuch, N. J. Ionospheric plasma bubble and GPS scintillation measurements in South Brazil or How far can plasma bubbles be observed in Brazilian longitudes? *Advances on Space Research*. (submetido para publicação em Outubro/2002b).
- Rodrigues, F. S.; de Paula, E. R.; Iyer, K. I.; Kintner, P. M.; Hysell, D. L.; Abdu, M. A.; Jardim, A. C. ESF irregularity characteristics over São Luís (Brazil) using VHF radar and GPS scintillations techniques. *Radio Science*, Vol. 39, No. 1, RS1S31, 24 fevereiro de 2003.
- Rodrigues, F. S.; de Paula, E. R.; Iyer, K. I.; Kintner, P. M.; Hysell, D. L.; Abdu, M. A.; Jardim, A. C. ESF irregularity characteristics over São Luís (Brazil) using VHF radar and GPS scintillations techniques. *Radio Science*, aceito para publicação em 2003.
- Seeber, G. *Satellite Geodesy: Foundations, methods, and applications*. Berlim: Walter de Gruyter, 1993. 531 p.
- Smita Dubey, Rashmi Wahi, A.K. Gwal. Ionospheric effects on GPS positioning, Space Science Laboratory, Department of Physics, Barkatullah University, Bhopal, MP 462026, Índia Received 1 November 2004; received in revised form 3 July 2005; accepted 8 July 2005.
- Sobral J. H. A.; Abdu M.A.; Takahashi H.; Taylor M. J.; de Paula E. R.; Zamlutti C. J.; de Aquino M. G.; Borba G. L. Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977-1998) of 630 nm airglow observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 64, n. 12-14, 1517-1524, Aug.-Sep. 2002.
- Sobral, J. H. A.; Abdu, M. A.; Zamlutti, C. J.; Batista, I. S. Association between plasma bubble irregularities and airglow disturbances over Brazilian low latitudes. *Geophysical Research Letters*, v. 7, n. 11, p. 980- 982, 1980.



T. Obara, M. Den, Y. Miyoshi, A. Morioka. Energetic electron variation in the outer radiation zone during early May 1998 magnetic storm. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, n. 62, p. 1405-1412, 2000.

Wrenn, G. L. (1987): Time-weighted accumulations  $ap(t)$  and  $Kp(t)$ , *J.Geophys. Res.*, 92, 10,125-10,129.

Yeh, K. C.; Liu, C. H. Radio wave scintillations in the ionosphere. *Proceedings of the IEEE*, v. 70, n. 4, p.324-360, Abr. 1982.



## **APÊNDICE A**

### **DESCRIÇÃO DO ARQUIVO SUMÁRIO**



A descrição do arquivo sumário gerado pelo programa SCINTMON é especificada na Tabela A.1.

Tabela A.1 – EXEMPLO DE DADOS GRAVADOS NO ARQUIVO SUMÁRIO.

```
SAO JOSE DOS CAMPOS BRAZIL
ABC-1998 CAMPAIGN
4085.0 -4209.2 -2498.5
2000 3 31 21 2
1
2100 8 104
02 11318.3 -15618.5 -17488.8 -1363 2458 0 0.09 90 9999
07 19999.4 -16823.2 4172.9 2271 2263 0 0.06 40 9999
08 19252.3 -3828.9 -18176.3 -885 3612 0 0.05 9999 9999
10 -1533.4 -26399.5 -650.3 -2016 2305 0 0.06 90 9999
13 19510.3 -17005.2 -5668.0 -1537 2540 0 0.08 94 9999
18 23117.5 -6180.0 11411.9 -3773 4663 0 0.04 9999 9999
26 -6198.2 -13952.5 -21722.0 3051 2656 0 0.05 51 9999
27 22290.1 -1129.8 -14684.3 -1603 3194 0 0.05 9999 9999
```

As cinco primeiras linhas fazem parte de um cabeçalho inicial de arquivo com as seguintes informações:

- 1<sup>a</sup> linha: Estação de Observação
- 2<sup>a</sup> linha: Informação adicional
- 3<sup>a</sup> linha: Coordenadas ECEF do receptor
- 4<sup>a</sup> linha: Ano Mês Dia Hora Minuto
- 5<sup>a</sup> linha: 1 (fim do cabeçalho)

A partir da sexta linha são gravados conjuntos de dados referentes a análise de um minuto, 3000 amostras, do sinal GPS, L1 = 1,57542 GHz, de cada satélite rastreado naquele minuto. Logo após, segue uma linha de sub-cabeçalho com as informações:

- 1<sup>a</sup> coluna: Hora (HHMM)
- 2<sup>a</sup> coluna: Número de satélites (n) rastreados naquele minuto
- 3<sup>a</sup> coluna: Potência de ruído

E então, segue-se “n” linhas com as seguintes informações sobre os satélites rastreados:

- 1<sup>a</sup> coluna: Identificação do satélite (PRN)
- 2<sup>a</sup> coluna: Coordenada ECEF X
- 3<sup>a</sup> coluna: Coordenada ECEF Y
- 4<sup>a</sup> coluna: Coordenada ECEF Z
- 5<sup>a</sup> coluna: Deslocamento Doppler (Hz) do sinal GPS
- 6<sup>a</sup> coluna: Potência em banda larga (WBP)
- 7<sup>a</sup> coluna: Número que indica quantas vezes o “lock” foi perdido naquele minuto



- 8<sup>a</sup> coluna: Índice de cintilação  $S_4$   
9<sup>a</sup> coluna: Largura de auto-correlação do sinal  
10<sup>a</sup> coluna: Não utilizado



## **APÊNDICE B**

**CERTIFICADOS DE PALESTRAS E CURSOS E RESUMOS DE CONGRESSOS,  
OS QUE A BOLSISTA FOI AUTORA E CO-AUTORA.**




**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**VICE-REITORIA DE EXTENSÃO E ASSUNTOS COMUNITÁRIOS**  
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA


**CERTIFICADO**

Certificamos que LILIAN MOOR, registro nº 460,  
participou do **XXII CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA E VII FEIRA DE PROTÓTIPOS**, promovido pela Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, no período de 29 a 31 de outubro de 2007, com duração de 24 horas.

A programação foi aprovada pela Câmara de Extensão em 05 de junho de 2007, ata nº 204.

Passo Fundo, 31 de outubro de 2007.

  
**Prof. Dermeval Rosa dos Santos**  
Diretor da Faculdade de Engenharia e Arquitetura

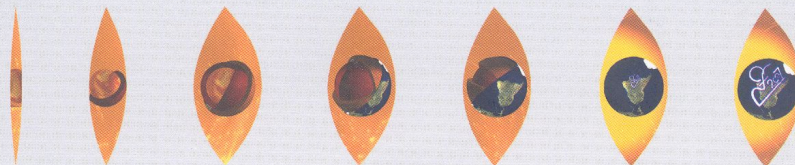
  
**Prof. Apônio Thomé**  
Coordenador do Congresso

  
**Prof. Ednardo Appel**  
Coordenador da Divisão de Extensão



# 10<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF

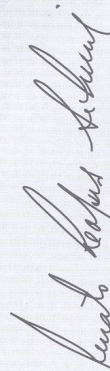
## Unveiling the Earth

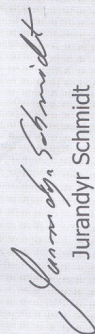


### CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho "Uso de Receptores Espaçados GPS e Receptores VHF para o Estudo da Velocidade Zonal das Irregularidades Ionosféricas" de autoria de Lillian Piecha Moor (CRS/CIE/INPE - MCT), Nelson Jorge Schuch (CRS/CIE/INPE-MCT), Tiago Jakulski (CRS/CIE/INPE-MCT), Juliano Moro (CRS/CIE/INPE-MCT), Cezar Daroit (CRS/CIE/INPE-MCT), Eduardo Ceretta (CRS/CIE/INPE-MCT), Acácio Cunha (Observatório Espacial de São Luís) e Eurico Rodrigues de Paula (INPE) foi apresentado durante o 10º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica.

Rio de Janeiro, 23 de novembro de 2007.

  
Renato Lopes Silveira  
SBGf President

  
Jurandy Schmidt  
General Secretary

Rio de Janeiro, Brazil - InterContinental Hotel - November 19 - 23, 2007





**Universidade Presbiteriana Mackenzie**

Decanato de Extensão  
Escola de Engenharia



## Certificate

We certify that

**LÍLIAN PIECHA MOOR**

has attended the IHY Latin American School, held at the Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brazil, from 14 to 20 February 2008

and presented an oral contribution entitled  
**"Comparação da velocidade de deriva zonal das irregularidades ionosféricas utilizando receptores espaçados de GPS e receptores VHF"**

São Paulo, February 20, 2008

  
Dr. Marcel Mendes  
Diretor da Escola de Engenharia

  
Dra. Regina C.F.M. Giora  
Decano de Extensão



  
Dr. Jean-Pierre Raulin  
Scientific Organizing Committee